N° d'enregistrement au C.N.R.S.

THESE de DOCTORAT D'ETAT

ès Sciences MATHEMATIQUES

présentée

à l'Université Pierre et Marie Curie
- Paris 6 -

par Monsieur Edmond KAHN

pour obtenir le grade de DOCTEUR ès SCIENCES

Sujet de la thèse :

Prétraitement d'images de teintes en reconnaissance des formes :
Application à l'extraction de contours, à la simplification, et
à la corrélation numérique.

soutenue le 3 novembre 1976

devant le jury composé de :

Monsieur J.C. SIMON, Président

Monsieur M. FRANCON, Examinateur

Monsieur G.W. STROKE, Examinateur

Monsieur J. VIGNES, Examinateur

Monsieur P. WENDEL, Examinateur

N° d'enregistrement au C.N.R.S.

THESE de DOCTORAT D'ETAT

ès Sciences MATHEMATIQUES

présentée

à l'Université Pierre et Marie Curie
- Paris 6 -

par Monsieur Edmond KAHN .....

pour obtenir le grade de DOCTEUR ès SCIENCES

Sujet de la thèse :

.....Prétraitement d'images de teintes en reconnaissance des formes:
.....Application à l'extraction de contours, à la simplification, et
.....à la corrélation numérique.....
.....
.....

soutenue le 3 novembre 1976 .....

devant le jury composé de :

Monsieur J.C. SIMON, Président.....

Monsieur M. FRANCON, Examinateur.....

Monsieur G.W. STROKE, Examinateur.....

Monsieur J. VIGNES, Examinateur.....

Monsieur P. WENDEL, Examinateur.....

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

PRETRAITEMENT D'IMAGES DE TEINTES EN RECONNAISSANCE DES FORMES .
APPLICATION A L'EXTRACTION DE CONTOURS , A LA SIMPLIFICATION , ET
A LA CORRELATION NUMERIQUE .

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548102_0038

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS 5

INTRODUCTION 6

BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION 12

CHAPITRE UN : SAISIE DE L'INFORMATION . 15

I Capteurs utilisés pour l'analyse d'images. 17

I-a Les analyseurs lents. 17

I-b Les analyseurs rapides à "spot" lumineux. 18

I-c Les analyseurs électroniques de télévision. 22

I-d Les analyseurs hertziens. 23

I-e Conclusion. 24

II Information continue, enregistrée ou non, à l'entrée des capteurs. 25

II-a L'oeil humain et la vision. 25

II-b Les enregistreurs à deux dimensions. 26

II-c Les enregistreurs à une dimension. 27

II-d Conclusion. 28

III Analyse d'images. 29

CHAPITRE DEUX : ANALYSE DE L'INFORMATION . 33

I Etalonnage d'un analyseur d'images. 35

I-a Dynamique. 35

I-b Bruit et nombre de niveaux. 37

I-c Balayage de l'image. 40

I-d Conclusions. 41

II Paramètres de l'analyse d'une image. 43

II-a Filtrage digital. 43

II-b Transmission de l'ouverture d'analyse. 44

II-c Simplification de l'information analysée. 45

II-d Conclusions. 48

III Prétraitement et filtrage digital d'une image numérique. 49

III-a Correction des défauts d'appareil. 49

III-b Filtrage digital d'images numérisées. 52

BIBLIOGRAPHIE DES CHAPITRES UN ET DEUX . 57

CHAPITRE TROIS : EXTRACTION DE CONTOURS . 63

I Extraction de traces ou de tracés. 65

I-a Extraction de traces dans un fond bruité. 65

I-b Extraction de tracés dont on connait l'orientation. 70

- Paramètres de référence pour le positionnement géométrique. 72
- Opérateurs de détection. 75
- Evaluation statistique des opérateurs. Recherche des seuils les mieux adaptés. 78

I-c Conclusions. 79

II Extraction des lignes de contraste. 80

II-a Utilisation des dérivées de l'image. 81

- Calcul des dérivées de l'image numérique. 82
- Choix d'un opérateur. 87
- Sélection des points de contour. 87
- Reconnaissance des éléments droits. 88
- Conclusions. 89

II-b Utilisation des histogrammes de l'image. 92

- Recherche d'un seuil de séparation. 92
- Décomposition de l'histogramme des transparences de l'image. 98
- Histogrammes de couples de paramètres associés à l'image. 99
- Conclusions. 103

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE TROIS . 104

CHAPITRE QUATRE : SIMPLIFICATION DES CONTOURS. CORRELATION NUMERIQUE . 110

I Simplification en points caractéristiques. 112

I-a Définition. 113

I-b Test de rupture de pente. 114

I-c Détection de sauts, choix de la contante C. 115

I-d Paramètres enregistrés ou attributs. 116

I-e Cas particuliers. 116

I-f Résultats. 117

I-g Conclusions. 123

II Reconnaissance des formes à partir de segments caractéristiques. 124

II-a Algorithme de suivi des contours. 126

II-b Détermination de rectangles dans un ensemble de segments caractéristiques. 132

II-c Résutats pratiques. 135

- Algorithme de la corde. 135
- Condition de rectitude des angles caractéristiques. 139
- Conclusions. 139

II-d Conclusions. 139

III Corrélation numérique. 144

III-a Première corrélation. 145

III-b Deuxième corrélation. 149

III-c Conclusion. 151

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE QUATRE . 155

CONCLUSIONS GENERALES . 158

ANNEXE . 160

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été préparée sous la direction du Professeur Jean-Claude Simon, auquel je dois une gratitude toute particulière pour la confiance qu'il m'a témoignée et pour les encouragements qu'il m'a prodigués, à l'Institut de Programmation de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), au Laboratoire Central de l'Armement, et à l'Université d'Etat de New York à Stony Brook.

Je remercie vivement les Professeurs G. W. Stroke et M. Halioua de m'avoir très bien reçu dans leur Laboratoire de Sciences Electro-optiques de l'Université d'Etat de New York à Stony Brook, de m'avoir donné toutes facilités pour écrire cette thèse, avec qui j'ai eu d'excellents entretiens, et dont les suggestions et les critiques m'ont été de grande utilité.

Je remercie les Professeurs M. Françon, J. Vignes et P. Wendel d'avoir accepté d'être membres de ce jury. Je les remercie de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Ma reconnaissance va également à MM. Chabannes, Nourissat et Roche, MM. Caillou, Fradet, Goujoux et Madec, du Département Electronique du L.C.A., ainsi qu'à MM. Baudoin, Brosse, Gramet, Guillon, Lemoine et Plouzeau, de passage au L.C.A..

Je dois également remercier les personnes qui m'ont fourni les images : Mme Petit-gars du Département P.C.M. du L.C.A. pour les photographies aériennes, M. Ducher de l'I.G.N. pour les couples stéréoscopiques, M. Viguier du C.E.A./D.A.M. de Vaujours pour les implosions, et M. Mauraisin de la Compagnie Honeywell-Bull pour les circuits imprimés.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans les contrats alloués par le C.E.A./D.A.M. de Vaujours et la D.R.M.E., et le soutien du Département Electronique du L.C.A..

INTRODUCTION

Le traitement des images a regroupé au départ des techniques principalement optiques et électroniques, mais aussi chimiques, dont le but principal est de fournir à l'oeil de l'observateur une bonne perception de l'information visuelle transmise. La perception est modelée par des considérations subjectives, et elle est sujette à des illusions dont on saisit mal l'origine. L'article de Nicholas K. HUMPHREY, (1), donne des indications à ce sujet et renvoie à une littérature plus spécialisée. J.K. HAWKINS, (2), fait par ailleurs une synthèse des problèmes que pose le traitement des images conçu comme une technique pour améliorer l'image qui est présentée à l'oeil. J.L. HARRIS, (3), apporte un élément de réponse en demandant à l'oeil de comparer l'image avant et après traitement. Il cherche à évaluer les images selon le but pour lequel elles ont été prises, et la manière dont elles doivent être examinées. Il distingue ainsi le problème de l'extraction d'informations du problème de la simple restitution. D. ESTOURNET, (4), fournit une description générale des différents procédés d'analyse et de restitution d'images. A. ROSENFELD et al, (5), donnent des indications bibliographiques intéressantes dans le paragraphe 4 consacré aux entrées-sorties. K. KNOWLTON et L. HARMON, (6), cités dans ce paragraphe, ont dressé un inventaire des méthodes de restitution d'images sur les périphériques classiques, en particulier les imprimantes. Les caractères d'imprimante sont ainsi souvent utilisés en sortie. Les échelles de teintes que l'on peut obtenir en combinant ces caractères ont été systématiquement étudiées dans (7) qui donne neuf niveaux de gris à l'intérieur d'une gamme de réflexion comprise entre 45% et 85%.

L'apport de l'informatique au traitement des images est important. L'informatique permet de coordonner des techniques plus anciennes, elle peut souvent les remplacer.

Une chaine optique, un montage électronique peuvent être entièrement simulés sur ordinateur. La sortie des résultats en fonction de nombreux paramètres est facilitée et ne nécessite plus d'effectuer des réglages délicats en laboratoire. On se reportera à (8) pour le principe des machines à lire, et à (9) pour les techniques d'analyse ultrarapide des images. On trouvera également dans (10) une revue des différents matériels de reconnaissance utilisés en lecture optique, en médecine, en météorologie et aux armées. Le principe, (11), et les performances, (12), du GALAXY, utilisé pour dépouiller des photographies de télescope, sont à rapprocher du système CALIFE, (13), (14), et (15), que nous avons utilisé pour nos études. On trouvera dans (16) un exemple d'étude de la faisabilité pratique d'un système d'identification d'étoiles réalisé à l'aide de méthodes mathématiques mises en oeuvre à bord d'un calculateur embarqué et d'un matériel de prise de vue adapté. Robert A. JONES, (17), montre comment une image peut être produite à partir de la donnée de sa granulosité, son contraste, son exposition, son échelle et son contenu pictural, dans un esprit de modélisation. On se reportera utilement aux Actes du Congrès International de 1967 sur les "flying spots", (18), surtout pour les applications au dépouillement de photographies de chambres à bulle.

Le traitement des images recouvre aussi toute cette partie de la reconnaissance des formes qui précède la reconnaissance proprement dite, et qu'on appelle le prétraitement. En effet, l'étape de la reconnaissance est d'autant plus facile à franchir que le prétraitement a été convenablement réalisé. Le prétraitement peut être divisé en trois étapes : 1) saisie, 2) analyse, 3) simplification de l'information. La reconnaissance constitue une quatrième étape. Dans le cas où il s'agit de transmettre, et non de reconnaître, la troisième étape du prétraitement doit être envisagée comme une compression d'information, plus ou moins poussée, selon la qualité de la transmission demandée. L.G. KRUL et al, (19), donnent un exemple de trans-

mission d'images dans le cas où il s'agit de vérifier des chèques à l'aide d'un système de télévision interne. Les images, des chiffres et des signatures, sont simples et peuvent être transmises à l'aide des lignes téléphoniques existantes. La quatrième étape n'est plus alors une reconnaissance, mais plutôt une simple restitution d'image. Nous renvoyons le lecteur à l'article de Thomas S. HUANG et al, (20), qui s'appuie sur 230 références, et où les techniques du traitement d'images sont réparties en trois domaines d'applications : amélioration de l'image, reconnaissance des formes dans l'image, codage efficace de l'image en vue de sa transmission ou sa mise en mémoire.

Les différentes étapes de la reconnaissance des formes ont fait l'objet d'études approfondies que nous nous proposons d'exposer dans les chapitres suivants. Par contre, nous ne nous sommes pas interessés au problème de la transmission d'images. L'amélioration de l'image n'a été conçue que dans la mesure où elle facilitait le travail de la reconnaissance des formes, c'est-à-dire, envisagée seulement dans le cadre du prétraitement, et non en vue de produire de belles images. L'amélioration de l'image ne nous a concerné que dans les cas où il s'agissait de produire de bonnes images, pour un traitement ultérieur. Nous exposerons le travail fait à cette occasion au chapitre deux.

Le but même de la reconnaissance des images est soit d'extraire des formes dans un fond plus ou moins bruité en vue de les identifier et éventuellement de les associer à des grandeurs mesurables (positions, dimensions, niveaux de transparence), soit de décomposer cette image en zones homogènes dont on cherche à reconnaitre individuellement la nature. L'allure des courbes qui constituent les frontières de ces zones est une caractéristique importante pour l'identification des formes extraites ou à extraire. Nous avons tenté de résoudre les problèmes ainsi posés

à l'ocasion de différentes applications : traitement d'images de cinéradiographie fente de sphères métalliques creuses durant leur implosion, (21), traitement d'images de dessin à la main de circuits imprimés dont on veut fournir automatiquement les coordonnées des extrémités des segments formant les équipotentielles ou les coordonnées du centre des trous métallisés, (22), traitement d'images de photographies aériennes dans le but de reconnaitre des formes géométriques, (23) et (25), de calculer le relief, (24), de soustraire des images de la même région prises à des instants différents, etc...

Les formes extraites, les courbes tracées aux limites des zones homogènes, constituent les résultats d'un premier niveau de traitement. Ces résultats peuvent être directement utilisables : c'est le cas des cinéradiographies de sphères où l'information extraite est l'ensemble des quatre courbes représentant les positions des diamètres dans le plan image. Ils peuvent necessiter un deuxième traitement : c'est le cas des photographies aériennes où la notion de ligne caractéristique s'est enrichie de la notion de points caractéristiques situées sur ces lignes, et de la notion de segments caractéristiques situés sur ces mêmes lignes. Ces points, ou ces segments, résument assez bien la structure des images auxquels ils sont associés jusqu'à permettre la corrélation numérique avec des images de structure voisine, mais déformées par l'effet d'une prise de vue différente, ou permettre l'identification de formes géométriques rectangulaires supposées être des éléments de base pour la formation de concepts aussi vagues, et pourtant aussi précis dans l'esprit des gens, que ceux de maisons. Points, segments, angles droits, rectangles, constituent les premiers mots d'un langage de forme, ou de description d'images, qui devra être suffisamment riche pour permettre de dire que deux images quelconques représentent la même scène. Une telle approche syntaxique a été utilisée par K. S. FU et B. MOAYER, (26), pour la représentation et la classification des empreintes digitale

Avant d'aborder la description des méthodes introduites précedemment, nous commençons par nous occuper de problèmes techniques qu'il faut résoudre au préalable : la saisie de l'information continue et sa numérisation qui font l'objet du chapitre un, et l'étude des caractéristiques des capteurs qu'il faut bien connaitre pour éliminer les différents bruits, afin de ne retenir que l'information utile (chapitre deux). Le chapitre trois traite des méthodes d'extraction de contours, le chapitre quatre des méthodes de simplification de ces contours, dont les résultats permettent d'aborder la reconnaissance et la corrélation numérique d'images.

Apports nouveaux de la thèse.

Les résultats nouveaux présentés dans cette thèse sont le fruit d'une étude systématique de différentes photographies réelles. Notre effort a porté sur des images d'implosion de sphères métalliques, sur des images de circuits imprimés tracés manuellement, et surtout sur les images aériennes, isolées, ou en couples stéréoscopiques.

Notre apport, dans le cadre de la reconnaissance des formes, a non seulement consisté dans l'étude de cas réels d'importance pratique, mais aussi dans le développement de méthodes nouvelles de traitement numérique d'images de teintes.

Les cas que nous avons étudiés sont les suivants :

1) Images d'implosions :

Nous avons développé des méthodes de filtrage digital à deux dimensions. L'utilisation de ces méthodes est nécessaire dès que l'on aborde le problème de la reconnaissance d'objets sur des images bruitées. La réduction du bruit des images d'implosions par filtrage digital nous a permis d'effectuer automatiquement des mesures avec une précision suffisante, (21), (28).

2) Circuits imprimés :

La densité des segments sur l'image, et la distorsion infligée aux mesures par l'analyseur d'images CALIFE, nous ont obligé à développer des méthodes particulières de positionnement des fenêtres d'analyse ou masques. Il est difficile de placer toute l'information utile à l'intérieur des masques, sans y mettre aussi trop d'information parasite. Nous avons cependant réussi à reconstituer automatiquement la cotation numérique des circuits avec très peu d'erreurs, (22).

3) Images aériennes :

Beaucoup de chercheurs ont essayé de trouver, et de mettre au point, un procédé automatique pour constituer une image de traits à partir d'une image réelle. Cependant, les résultats sont généralement décevants. Les méthodes habituellement utilisées

s'inspirent de méthodes purement mathématiques, mal adaptées à des cas réels. Notre approche est différente en ce sens qu'elle tient compte de la manière dont l'image réelle est obtenue et numérisée, (14), (27).

3-a) Images isolées :

On peut considérer que les photographies aériennes sont composées de zones dont la transparence moyenne est sensiblement constante. Par ailleurs, l'analyseur d'images CALIFE répond fidèlement à des niveaux de transparence constante et la répartition statistique des niveaux affichés est approximativement gaussienne. Notre méthode, (14), (23), permet d'abord d'extraire les niveaux réels dans l'ensemble des niveaux affichés puis d'affecter ces niveaux aux différentes zones. L'image de traits est obtenue comme sous-produit de ce procédé. Nous avons ensuite étendu la méthode en étudiant les répartitions statistiques des réponses à des opérateurs numériques travaillant localement sur plusieurs points, et nous avons ainsi obtenu des images de traits plus informantes. Nous les avons alors utilisées pour reconnaitre des formes d'objets rectangulaires sur des photographies réelles d'images aériennes, après simplification de l'image de trait en une image de segments de droite, (23). Des règles de sémantique ont alors été appliquées avec succès pour identifier des formes rectangulaires à partir d'éléments plus simples, (25). Notre travail a ainsi permis d'obtenir un résultat important : la possibilité de reconnaitre automatiquement des formes simples sur des images réelles.

3-b) Images en couples stéréoscopiques :

Nous avons également utilisé les images de traits pour la corrélation numérique de deux images aériennes du même site et ainsi obtenir automatiquement son relief : les images de traits ont été réduites à des images de points caractéristiques rappelant des points sur le terrain, puis les points ont été corrélés entre eux. Ce travail sur la corrélation numérique d'images nous a permis d'obtenir un fichier altimétrique à partir de la donnée d'un couple stéréoscopique, (24). La précision du résultat sur un cas réel se situe entre les précisions fournies par les appareils opérationnels PRESA et STEREOMAT. Ce dernier travail pourrait fournir une nouvelle méthode de fabrication des cartes géographiques, par corrélation numérique plutôt que par manipulation analoque. Par ailleurs, des développements importants sont attendus de cette méthode de corrélation d'images de points caractéristiques, pour aider à résoudre des problèmes plus généraux de reconnaissance des formes, (29).

BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION

(1) HUMPHREY N. K. "Les illusions visuelles" , La Recherche , n° 25 , juillet-août 1972 , volume 3 , pp. 631 à 638 .

(2) HAWKINS J. K. "Image processing : a review and projection" , Automatic Interpretation and Classification of Images , edited by A. GRASSELLI , Academic Press New York London 1969 , chapitre 10 , pp. 199 à 234 .

(3) HARRIS J. L. "Image evaluation and restoration" , Journal of the Optical Society of America , volume 56 n° 5 , may 1966 , pp. 569 à 574 .

(4) ESTOURNET D. "Informations d'images, analyse, transmission, traitement" , Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées , 1970 , pp. 122 à 184 .

(5) ROSENFELD A. et KAK A. C. "Digital picture processing : a guide to the literature" , Maryland University , College Park , Maryland , sept. 1973 .

(6) KNOWLTON K. et HARMON L. "Computer produced grey scales" , Computer Graphics and Image Processing , volume 1 , 1972 , pp. 1 à 20 .

(7) EKLUNDH J., GRAMBO S., ORHAUG T. "Scale of blackness for a line printer for picture generation" , Research Institute of National Defense , Stockholm , Suède , 1972 .

(8) WEAVER J. A. "Reading machines" , Mills and Boon Ltd , Londres , 1972 .

(9) JENSEN N. "High speed image analysis techniques" , Photogrammetric Engineering , volume 39 , dec. 1973 , pp. 1321 à 1328 .

(10) SAFRONOV Y. P., TIKHOMIROV I. N., ULYANOV G. I. "Recognition devices" , traduit de Raspoznayushchiya Ustroystva , Voyenizdat Press , 1970 , pp. 1 à 88 .

(11) WALKER G. S. "The design and development of the Galaxy machine" , Proceedings of the 11th Colloquium of the International Astronomical Union , August 1970 .

(12) PRATT N. M. "The performance of Galaxy" , Proceedings of the 11th Colloquium of the International Astronomical Union , August 1970 .

(13) NOURISSAT Y. "L'analyseur d'images CALIFE" , L'Onde Electrique , 1969 , volume 49 , n° 8 , pp. 869 à 873 .

(14) KAHN E. "Un système d'analyse optique : le CALIFE, première partie : l'étalonnage" , Nouvelle Revue d'Optique Appliquée , 1972 , tome 3 , n° 4 , pp. 209 à 215 .

(15) ROCHE C. "L'analyseur d'images CALIFE, ses performances, son utilisation" , Journées d'études sur le traitement des images organisées par le C.N.E.S. au C.N.R.S. , PARIS , 13-15 déc. 1972 , pp. 257 à 265 .

(16) MOREL C., DENIEUIL F. "Système d'identification stellaire" , Association Technique Maritime et Aéronautique , 47 rue de Monceau , PARIS , 1968 .

(17) JONES R. A. "Investigation of Image Simulation Procedures" , Photographic Science and Engineering , volume 13 , n° 1 , jan.-feb. 1969 , pp.24 à

(18) 1967 International Conference on Programming for Flying Spot Devices , held at Max Planck - Institut für Physik und Astrophysik , Munich , January 18-20 , 1967 .

(19) KRUL L. G., REIJNIERSE P. "Transmission d'images simples" , Philips Technical Review , tome 32 , n° 2 .

(20) HUANG T. S., SCHREIBER W. F., TRETIAK O. J. "Image processing" , Proceedings of the I.E.E.E. , volume 59 , n° 11 , nov. 1971 , pp. 1586 à 1609 .

(21) KAHN E., NOURISSAT Y., VIGUIER P. "Acquisition et traitement de cinéradiographies ultrarapides" , Actes du Congrès International de Cinématographie Ultrarapide , 1972 , pp. 198 à 202 .

(22) KAHN E. "Traitement automatique des images appliqué aux photographies de circuits imprimés dessinés à la main" , L'Onde Electrique , à paraître .

(23) KAHN E. "Un système d'analyse optique : le CALIFE , deuxième partie : reconnaissance des formes sur photographies aériennes" , Nouvelle Revue d'Optique Appliquée , 1972 , tome 3 , n° 5 , pp. 273 à 279 .

(24) KAHN E., PIQUET-PELLORCE D. "Etude de corrélation numérique automatique en vue de l'obtention d'un fichier altimétrique" , Actes du Symposium de la Société Internationale de Photogrammétrie , Commission IV , 1974 , publiés dans le Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie , n° 57 , jan. 1975 , pp. 30 à 33 .

(25) KAHN E., LEMOINE D. "Reconnaissance des formes sur photographies aériennes" , Automatisme , à paraître .

(26) FU K. S., MOAYER B. "Syntactic pattern recognition of fingerprints" , Purdue University, School of Electrical Engineering, West Lafayette, Indiana, déc. 1974, TR-EE 74-36 .

(27) KAHN E. "Méthodes de prétraitement et de filtrage des images, applications diverses avec exemples à l'appui" , Actes des journées d'études sur le traitement des images, Centre National d'Etudes Spatiales, 13-15 déc. 1972, pp.41 à 49 .

(28) KAHN E. "Filtrage digital d'une image sur ordinateur", Actes de la 39ème Réunion de l'Equipe Nationale des Méthodes, 4 juin 1970 .

(29) ROCHE C., KAHN E., TROGNON J. "Un centre de traitement digital des images, ses capteurs, ses méthodes" , Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie, n° 52, oct. 1973 , pp. 8 à 21 .

CHAPITRE UN

SAISIE DE L'INFORMATION

Dans ce chapitre, nous traitons de la saisie de l'information continue et de sa tranformation en information discrète. Un premier paragraphe est consacré aux capteurs, c'est-à-dire aux appareils d'analyse d'images que l'on rencontre le plus souvent, et dont la fonction est en fait celle d'un convertisseur analogique-numérique. Le deuxième paragraphe traite des différents d'enregistrement de l'information continue qui est présentée aux capteurs décrits précedemment. L'information visuelle est soit analysée directement, c'est-à-dire en prise directe, ou fait l'objet d'une prise de vue pour être enregistrée sur un support intermédiaire qui est placé à l'entrée du capteur approprié (prise indirecte). Le troisième paragraphe met en relief les pertes successives d'information lors de la création de l'image, de sa mise en mémoire sur un support et de son analyse, étapes cependant nécessaires pour pouvoir traiter l'image sur ordinateur. Ces différents intermédiaires entre le champ de la vision et l'information visuelle numérique transmise à l'ordinateur ont pour effet d'ajouter du bruit et de provoquer des distorsions; d'autre part une série de filtrages passe-bas limitent la finesse de l'analyse. Différentes méthodes de reconstitution de l'image à partir des nombres ou échantillons fournis par un appareil ont été étudiées, et la manière de représenter l'image à l'aide de fonctions d'habillage g_n et des échantillons, (1), (7), et (11).

I CAPTEURS UTILISES POUR L'ANALYSE D'IMAGES

Dans ce paragraphe, nous examinons divers systèmes d'analyse d'images actuellement utilisés en France et dans le monde. Nous n'avons pas cherché à dresser la liste complète des analyseurs, notre travail ayant surtout consisté à tirer parti de matériels facilement accessibles. Pour tout approfondissemnet, le lecteur voudra bien se référer à la littérature spécialisée, et pour une première lecture à (8) .

I-a Les analyseurs lents .

Dans les cas où on peut se contenter de l'analyse lente d'une image fixe, on se sert toujours des systèmes mécaniques et optiques. Ces analyseurs sont en effet les seuls qui autorisent une définition en pratique aussi élevée que l'on veut : il suffit d'accepter leur encombrement et leur lenteur. Nous ne les avons pas utilisés.

Les microdensitomètres permettent d'analyser des négatifs de plusieurs centaines de cm^2 à l'aide d'une ouverture d'analyse de quelques μm^2. Par contre, la vitesse d'analyse est très faible : plusieurs minutes par ligne. Le positionnement de l'ouverture d'analyse s'effectue à l'aide de deux chariots à mouvements perpendiculaires, l'ouverture est elle-même réalisée à l'aide d'un objectif de microscope, la lecture de la lumière transmise se fait au moyen d'un organe photoélectrique. Les applications pour lesquelles le paramètre finesse d'analyse est déterminant relèvent de ce type d'appareils. Par exemple, les problèmes de dépouillemnt des plaques photographiques provenant d'observatoires pour le calcul de la magnitude des étoiles.

Les analyseurs téléphotographiques permettent de transmettre des images fixes par la voie téléphonique classique et sont surtout utilisés par les services de presse. L'analyse complète d'une photographie (25 cm , 1000 lignes) dure 16 minutes.

L'image est plaquée sur un cylindre animé d'un mouvement de rotation et d'un mouvement de translation. Une faible surface de la photographie est violemment éclairée, et l'image de cette partie éclairée est formée, par un objectif du type microscope, agrandie, sur un masque comportant une petite ouverture. Derrière l'ouverture d'analyse se trouve un photomultiplicateur qui reçoit un signal de porteuse et fournit un signal modulé en amplitude. Le bruit est assez important et la dynamique est de 30 à 35 dB dans les meilleurs cas.

I-b Les analyseurs rapides à spot lumineux .

Tout comme les analyseurs lents que nous venons de décrire rapidement, l'analyseur "flying spot" est un analyseur d'images enregistrées sur une mémoire optique. Ces images sont, dans la plupart des cas, des diapositives de petit format, ou des films cinématographiques. Les analyseurs "flying spot" ont contre eux d'être lourds et délicats, pour eux leur finesse et leur dynamique. Par ailleurs, les deux paramètres finesse et rémanence sont contradictoires. C'est ainsi que des phosphores dont la rémanence est négligeable après 100 µs comportent une granularité qui limite la finesse, et que certains écrans fluorescents peuvent séparer jusqu'à 50 lignes par mm, mais ont une rémanence de l'ordre de la milliseconde.

Le système que nous avons utilisé pour nos études, appellé CALIFE au Laboratoire Central de l'Armement est un lecteur optique de cette catégorie. Il est adapté à la mise au point de programmes de reconnaissance des formes sur photographies de petit format. Nous nous proposons de le décrire ici et de montrer comment nous en avons tiré parti dans les chapitres suivants.

Description du système CALIFE , (9), (13), et (19) : il permet de numériser les transparences d'une diapositive 24 x 36 ou d'un cliché de film 35 mm pour obtenir un tableau de 2400 x 3600 points correspondant chacun à une numérisation de

l'intensité sur 256 niveaux de gris. Il est branché comme terminal temps réel d'un ordinateur C.I.I. 10070 : celui-ci commande la déflexion du spot par l'envoi de deux mots binaires correspondant aux coordonnées X et Y du point à analyser; en retour il reçoit un mot binaire codant la transparence au point correspondant de la diapositive. Le schéma de principe du fonctionnement du Calife est donné à la figure 1.

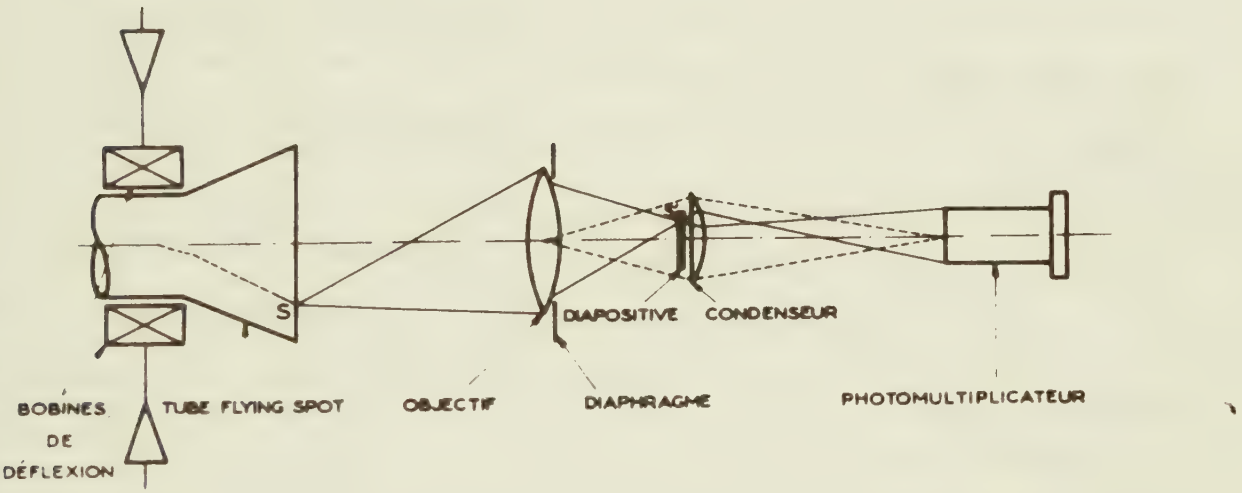


Fig. 1 - Schéma de principe de l'analyse d'une image à l'aide du système CALIFE.

1) Partie électronique de positionnement.

Les valeurs numériques provenant du 10070 et correspondant aux coordonnées X et Y du point de la diapositive à analyser sont transformées en deux tensions analogiques par deux décodeurs numériques-analogiques. Ces tensions amplifiées commandent les deux déflecteurs du tube cathodique.

Un générateur d'impulsions n'allume le spot par tension de Wehnelt que lorsqu'il est stabilisé et l'éteint pendant ses déplacements. Le positionnement du spot s'effectue environ en 40 µs. Lorsque le spot est stabilisé, la mesure est faite soit en 10 µs, soit en 100 µs suivant une option prise en début d'analyse. On peut alors

analyser une photographie complète, dans un cas en 8 minutes, dans l'autre en 20 minutes. Le gain par rapport au dispositif précédent n'est pas très grand, mais les points peuvent être numérisés dans un ordre quelconque. Suivant la durée de la mesu celle-ci s'effectue avec une précision plus ou moins grande, par une intégration du bruit dû principalement au photomultiplicateur, comme dans le dispositif précédent.

2) Partie optique.

Une partie optique positionne le spot sur l'image et mesure la quantité de lumière qui l'a traversée. Elle comprend :

- le tube cathodique constituant la source lumineuse par son spot,
- l'objectif formant l'image de la face avant du tube sur la diapositive,
- le photomultiplicateur et son condenseur mesurant la quantité de lumière qui a traversé la diapositive.

Le rapport de réduction géométrique entre l'écran cathodique et le cliché est de 2,7. Le diamètre du spot est donc de 10 µm sur la photographie. Dans ce cas, 2400 x 3600 points sont analysés, le pas d'exploitation étant de la même dimension que le diamètre du spot.

3) Partie électronique d'acquisition.

Deux sorties possibles ont été prévues pour le photomultiplicateur; une sortie sur un comparateur et une sortie sur un convertisseur analogique-numérique.

Une tension de référence peut être comparée (première utilisation) à la tension de sortie du photomultiplicateur. Une valeur de 0 ou 1 est donc transmise dans ce cas à l'ordinateur.

Le convertisseur analogique-numérique transmet à l'ordinateur (deuxième utilisation) une valeur codée sur 8 bits de la transparence locale A(x,y) de la diapositive au point (X,Y).

4) Correction de distorsion, de défaut de phosphore, de bruit.

Ce système de concentration produit des aberrations, comme un autre système optique, mais aussi à cause de la répulsion mutuelle des électrons. Des distorsions géométriques existent aussi, dues aux effets de bord des bobines de déviation et à la planéité de la face avant du tube cathodique : c'est l'effet de coussin.

Ces distorsions sont corrigées :

- on modifie le courant de concentration dynamiquement, en utilisant une bobine additionnelle traversée par un courant de la forme :

$$i = k \cdot (X^2 + Y^2)$$

X et Y étant les tensions de déviation.

- on corrige le balayage du tube par des tensions de déviation de la forme :

$$X' = kX.(X^2 + Y^2)$$

$$Y' = kY.(X^2 + Y^2)$$

Ces corrections existent sur Calife, de même qu'une correction d'astigmatisme statique au centre du tube.

La couche sensible du tube qui reçoit l'énergie des électrons et qui émet des photons est appellée phosphore. Elle a une structure granuleuse qui fait que l'intensité de la lumière varie d'un point à un autre. Elle varie aussi entre le centre et les bords du tube.

CALIFE possède un photomultiplicateur de référence qui reçoit la lumière du spot, sans passer par le cliché. La mesure de la densité du cliché est alors faite par le rapport entre les deux tensions de sortie des photomultiplicateurs.

Le signal de sortie du photomultiplicateur possède un bruit dû à la distribution discontinue de l'énergie des photons et aux étages de multiplication d'électrons. Pour combattre cet effet on numérise la valeur moyenne du signal, intégrée sur la durée de l'impulsion.

5) Commandes spéciales.

Calife possède une avance automatique de cliché commandée par l'ordinateur. Un moteur pas à pas provoque l'avance du film; il est commandé par l'ordinateur suivant trois types d'avances :

- un saut de photographie,
- une avance en mode recherche : on recherche pas à pas le bord de la photographie suivante par test sur la luminosité,
- un cadrage systématique : avance d'une longueur fixée.

Concluons sur l'appareil CALIFE en remarquant que le balayage lumineux est réalisé par l'artifice d'un intermédiaire électronique. On cherche actuellement à réaliser ce balayage par d'autres systèmes. La déflexion lumineuse au moyen d'un miroir à commande piézoélectrique est une solution. Une autre consiste dans l'excitation d'un liquide transparent par des ultrasons, (56), (63), (64).

I-c Les analyseurs électroniques de télévision .

Disons tout de suite qu'ils sont spécialement indiqués pour transmettre des images mobiles. La vitesse de leur analyse permet à chaque point de l'image de subsister un certain temps sur l'écran. Les analyseurs sans accumulation n'exploitent pas cette énergie complètement et sont voisins des appareils à flying spot que nous avons décrits précedemment. Citons sans les décrire les analyseurs à accumulation à électrons rapides, à accumulation à électrons lents en renvoyant le lecteur à la littérature spécialisée, (57), (58).

Les vidicons sont des analyseurs à photoconductivité qui peuvent être améliorés l'utilisation d'une émission secondaire. Un faisceau de lecture à électrons lents vient charger la surface de la couche photoconductrice, ce qui fait naitre un courant qui est une fonction de l'éclairement de la cible.

Dans les analyseurs à l'état solide, l'image se forme sur un ensemble d'éléments photosensibles, comme dans le vidicon. Les éléments commutés sont des photodiodes, ou des phototransistors, ou des photorésistances, placés au point d'image considéré. Ils constituent une mosaïque de forme matricielle, le balayage est alors effectué de la même façon que l'adressage d'une mémoire d'ordinateur et le prélèvement du signal d'image de la même façon que la lecture. Des développements importants sont attendus de cette nouvelle technologie, qui permettra d'analyser des images par petites portions de 50 x 50, 128 x 128 et même plus, ou globalement à faible définition, en vue de les traiter dans un but de reconnaissance des formes, (57), (58).

Terminons ce paragraphe en citant les amplificateurs de brillance dont la fonction est d'augmenter la sensibilité des appareils sur lesquels ils sont placés en aval.

I-d Les analyseurs hertziens .

L'analyse du rayonnement propre des objets dans les fréquences lumineuses conduit aux techniques de prises de vue astronomiques. Dans le domaine des plus grandes longueurs d'onde, infrarouge ou hertzienne, le rayonnement est le plus important, et si dans le cas de l'infrarouge, les techniques d'analyse d'images ressemblent à celles du domaine visible, dans le cas des ondes hertziennes, elles relèvent de la radiométrie ou du radar de vision du sol. Dans le cas de l'analyse passive, la finesse de l'image est limitée par les phénomènes de diffraction, et du fait même de la nature incohérente des signaux rayonnés par les objets, et du bruit de fond des récepteurs, on n'obtient que peu de niveaux. Dans le cas de l'analyse active, l'utilisation d'un éclairement de nature cohérente améliore la sensibilité et la finesse, mais il est difficile de résoudre le problème de la stabilité de l'analyseur et celui des déformations géométriques.

I-e Conclusion .

Nous avons décrit quelques appareils dont la fonction consiste, à partir d'informations continues, enregistrées ou non, à les représenter par des nombres qu'il faudra ensuite interpréter en fonction des problèmes posés. En fait, nous avons surtout travaillé sur les valeurs numériques fournies par le système CALIFE, à partir d'images enregistrées sur clichés. Nous aurions tout aussi bien pu nous servir des nombres fournis par un microdensitomètre ou une matrice de photodiodes. Nous avons à l'occasion d'une application particulière, (16), traité d'un même problème avec deux saisies d'information différentes, l'une à l'aide de l'appareil CALIFE du phénomène physique enregistré sur photographie, l'autre par numérisation du phénomène physique enregistré sur bande vidéo. Nous avons ainsi montré que les méthodes mises au point sur des nombres fournis par un appareil, dont la fonction revient à celle d'un convertisseur analogique numérique, étaient encore valables sur les nombres fournis par un appareil d'un principe différent, mais dont la fonction est équivalente.

II INFORMATION CONTINUE, ENREGISTREE OU NON, A L'ENTREE DES CAPTEURS

A l'entrée des capteurs se trouve l'information qui doit être traitée une fois que ces capteurs ont rempli leur rôle de convertisseur analogique-numérique. Cette information, dans le cas de la prise directe, est le milieu ambiant dans lequel le capteur a été placé, ou, dans le cas de la prise indirecte, est une mémorisation de ce milieu ambiant. C'est le dernier cas que nous avons étudié, le système CALIFE numérisant des clichés qui sont en fait des mémoires optiques d'un champ de vision.

Dans ce paragraphe, nous dirons un mot du cas de la prise directe en abordant le problème de l'oeil et de la vision, puis nous consacrerons le reste du paragraphe aux enregistreurs à deux dimensions dont le prototype est l'émulsion photographique, et aux enregistreurs à une dimension dont la bande magnétique représente un bon modèle.

II-a L'oeil humain et la vision .

Une manière d'expliquer la vision est de dire qu'elle est le résultat de la perception fugitive et toujours renouvelée de l'univers. On peut considérer que l'information saisie en prise directe par l'oeil est située sur un support de mémoire non matérialisé. Selon ce modèle, le capteur est constitué de la rétine du fond de l'oeil, connecté à des organes de traitement situés dans le cerveau.

La rétine est constituée de deux sortes de cellules photosensibles : les cônes et les batonnets. Ces cellules sont concentrées dans la région focale du cristallin, la tache jaune comprenant environ 2000 cellules, presque uniquement des cônes. Dans la tache jaune, les cònes sont jointifs et leur dimension moyenne est de 2 microns. Les cònes sont des organes sensibles aux lumières fortes normales et rendent compte des couleurs. Dans les régions périphériques de la rétine, les cellules

sont surtout des batonnets. Ils sont plus sensibles que les cônes et fonctionnent en lumière faible. Ils ne rendent pas compte des couleurs ("la nuit tous les chats sont gris!"), et sont moins serrés, la région périphérique est donc moins précise que la région centrale. Si au centre, l'image ne comporte que 2000 points, le nystagmus de l'oeil (mouvement de balayage) permet d'augmenter considérablement, par superposition, le nombre de points analysés. D'autre part, une caractéristique importante de l'oeil est la vision des contrastes : ainsi une zone grise sur un fo moitié noir, moitié blanc, apparait en gris clair sur la partie noire, et gris foncé sur la partie blanche; une mire constituée de tranches de gris uniformes et de densités croissantes (gamme de gris) apparait bien contrastée aux limites des tranches, mais les tranches de gris ne sembleront pas uniformes. On peut même créer l'illusion optique, (31), qui consiste en l'observation d'une mire de densité constante, où sur une ligne la densité suit une loi sinusoïdale. Les deux plages de part et d'autre de cette ligne ne paraissent pas avoir la même teinte. Notons aussi la présence d'un bruit rétinien qui est très variable selon les conditions d'utilisation de l'oeil. Nous l'assimilons au bruit occasionné par n'importe quel appareil numériseur. La rétine possède aussi d'autres propriétés que nous ne ferons que citer dans la mesure où nous n'avons pas utilisé d'appareils possédant ces propriétés : la vision des mouvements et la vision des couleurs.

En bref, nous pouvons dire que la rétine enregistre une répartition plane d'informations lumineuses que le cerveau se charge d'interpréter.

II-b Les enregistreurs à deux dimensions .

Parmi les enregistreurs à deux dimensions, l'enregistreur photographique est le plus souvent utilisé. C'est en effet une mémoire optique conçue sur le modèle de l rétine.

L'enregistrement photographique d'une image consiste en un ensemble de grains

opaques d'argent, la valeur de l'enregistrement de l'éclairement lumineux en un point étant traduite par la densité des grains. Cette granularité a pour effet de limiter la quantité d'information enregistrable par filtrage passe-bas et génération d'un bruit de fond. Nous verrons cette question en détail au chapitre deux. Les émulsions photographiques ont bien entendu d'autres caractéristiques qu'il convient de bien connaitre lorsqu'on veut comprendre la signification des nombres qui seront fournis à l'occasion d'une analyse de ces émulsions : la courbe de transfert en amplitude ou courbe de noircissement, et la rapidité. Toutes ces caractéristiques sont liées entre elles et également à des paramètres externes qui sont difficilement stabilisables et qui sont tous ceux d'un laboratoire de photographie.

D'autres types d'enregistrements ne conduisent pas à l'analyse mais correspondent à des techniques de restitution comme le fac-similé ou les phosphores. Nous ne ferons que les citer, pour passer aux surfaces enregistreuses analysables. Ces surfaces ont été étudiées pour éviter l'inconvénient du traitement chimique caractéristique de l'enregistrement photographique. Elles ne sont rentables que dans la mesure où elles garantissent une qualité d'enregistrement au moins équivalente. Les procédés le plus souvent utilisés sont les procédés thermoplastiques, électrostatiques ou à semi-conducteurs, (28), (61), (62).

II-c Les enregistreurs à une dimension .

Les enregistreurs du signal vidéo provenant de l'analyse par lignes des images sont en général du type magnétique. Le magnétoscope permet d'enregistrer un signal, en travers d'un ruban qui défile à vitesse normale, suivant des lignes parallèles. Cette structure est compatible avec celle des images de télévision. Ce système permet de restituer facilement sur télévision des images enregistrées sur bande à partir d'un système de prise de vue du type caméra.

Il existe également des enregistreurs à disque magnétique, prévus pour enregis-

trer environ 30 secondes de signal vidéo, et aptes à être mis en lecture immédiatement : ce sont les vidéodisques. Dans le cas de l'enregistreur électrophotographique, l'enregistrement se fait sur une émulsion photographique sensible aux électrons : c'est le signal qui module en intensité le pinceau électronique finement focalisé qui vient impressionner le film, (59), (60).

II-d Conclusion .

Le but de ce paragraphe était de faire un tour d'horizon des différentes méthodes d'enregistrement de l'information continue à convertir en information discrète, en vue d'un traitement numérique ultérieur. La prise indirecte permet de conserver un témoin avant traitement de l'information traitée, ce qui n'est pas le cas pour la prise directe. On préfère mettre au point les méthodes en prise indirecte. Passer en prise directe est cependant un but à atteindre, surtout en robotique, dès qu'un traitement automatique d'images s'est avéré possible en prise indirecte. Notre but est de montrer ce qu'il est possible de faire actuellement.

III ANALYSE D'IMAGES

De même qu'un appareil d'optique associe à un objet une fonction éclairement
x,y) dans un plan image, où x et y sont les coordonnées cartésiennes d'un point
l'image, nous pouvons dire qu'un capteur, tel que nous l'avons défini au para-
aphe I, associe à une image théorique g(x,y) où x et y $\in \mathbb{R}$, une image numérique
X,Y) où X,Y $\in [a,b]$ sur $\mathbb{N}$, résultat de l'analyse par le capteur de l'image théo-
que. Le capteur peut être branché directement sur l'univers environnant, et le
présenter à l'aide de nombres, ou numériser le résultat d'un enregistrement de
univers sur un support approprié (voir paragraphe II).

Les sources d'erreurs dûes au processus qui permet d'obtenir la fonction T(X,Y) à
rtir de la fonction g(x,y) sont multiples et différentes; elles interviennent lors
la création même de la fonction g(x,y) à l'aide de l'appareil d'impression (prise
vue), au niveau de l'enregistrement, à cause des défauts dûs au support enregis-
eur (émulsion, bande magnétique, etc...), et lors de l'analyse elle-même, à cause
s limitations de l'appareil numériseur. Ces sources d'erreurs peuvent être classées
trois familles. La première famille comprend les erreurs dues à la finesse limi-
e des appareils d'analyse. Les appareils agissent sur le spectre des grandeurs ob-
rvées comme le feraient des filtres passe-bas. L'amplitude des hautes fréquences au
là d'un seuil est très atténuée. La deuxième famille regroupe toutes les adjonctions
bruit au signal (bruit électronique, fond lumineux parasite, etc...). La troisième
ille comprend toutes les distorsions (distorsions géométriques des instruments d'op-
que, du balayage électronique, distorsion d'amplitude des récepteurs photosensibles).

La fonction T(X,Y) est entièrement définie sur la trame d'une portion de plan. Il
nécessaire dans certains cas de revenir à une fonction voisine de g(x,y) pour
re subir certaines transformations, la rotation en particulier, à la fonction
X,Y) lors du traitement, sans être obligé de faire tourner l'image initiale par
port au capteur et numériser à nouveau. Des méthodes de reconstitution de

l'image g(x,y) à partir de l'information T(X,Y) ont été mises au point, en particulier par GUIHO, (1). L'image reconstituée est échantillonnée mathématiquement selon une nouvelle trame, orientée différemment dans le cas de la rotation, d'un pas différent dans le cas d'un changement d'échelle.

Le but du chapitre un était de familiariser le lecteur avec les problèmes de la saisie d'informations d'image sans essayer d'en faire une étude quantitative. Les problèmes ont surtout été présentés de manière descriptive ou qualitative. C'est au chapitre deux que nous essaierons de montrer quantitativement ce qu'il a été obtenu des mesures faites sur le système CALIFE.

Avant de passer au chapitre deux, nous donnons quelques définitions et un modèle de représentation des images numérisées utiles pour la compréhension de la suite.

Définition 1 .

Une fonction s(x,y) est un signal (ou une image) si elle est continue et dérivable à l'ordre $n_1 \geq 1$ suivant x et à l'ordre $n_2 \geq 1$ suivant y, et si sa transformée de Fourier S(u,v) est à support borné.

$$\exists\, a,b \in \mathbb{R}^+ \;:\; S(u,v) = 0 \text{ si } |u| \geq a \text{ et (ou) } |v| \geq b$$

Fixons $y = y_0$, si $s(x,y_0)$ varie entre $-M_1$ et $+M_1$, le théorème de Bernstein entraîne

$$|s^{(n_1)}(x,y_0)| \leq (2\pi a)^{n_1} M_1 \quad \text{où} \quad s^{(n_1)}(x,y_0) \text{ représente la dérivée } n_1^{\text{ième}}$$

de $s(x,y_0)$.

Fixons $x = x_0$, si $s(x_0,y)$ varie entre $-M_2$ et $+M_2$, on a également :

$$|s^{(n_2)}(x_0,y)| \leq (2\pi b)^{n_2} M_2 \quad \text{avec la même notation .}$$

Nous admettrons que la représentation s(x,y) d'une image optique a pour transformée de Fourier une fonction à support borné. Une conséquence de cette propriété est le théorème de Nyquist-Shannon :

Le signal s(x) s'écrit : $s(x) = \sum_{-\infty}^{+\infty} s(p\alpha)\, g(\frac{x}{\alpha} - p)$ (1)

avec : $g(x) = \frac{\sin \pi x}{\pi x}$, $p \in \mathbb{Z}$, $\alpha = \frac{1}{2a}$

L'équation (1) indique que le signal s(x) peut être décomposé en une infinité dénombrable d'échantillons. Un tel résultat est d'intérêt théorique.

En pratique, il faut un nombre limité d'échantillons dont la précision est fixée. nous utilisons pour cela les procédés g_n , (7).

La représentation $\sigma_n(x)$ adoptée à partir des valeurs échantillonnées e(pα) de s(x) aux points pα est inspirée par l'équation (1) :

on a : $\sigma_n(x) = \sum_p e(p\alpha)\, g_n(\frac{x}{\alpha} - p)$ (2)

où les fonctions $g_n(x)$ sont à support borné et constituées d'arcs de polynomes de degré n.

Cette représentation $\sigma_n(x)$ se généralise à deux dimensions, à partir des valeurs échantillonnées e(pα,qβ) du signal s(x,y) aux points (pα,qβ) si $p,q \in \mathbb{Z}$ et $\alpha = \frac{1}{2a}$ $\beta = \frac{1}{2b}$, (1).

on a : $\sigma_n(x,y) = \sum_{p,q} e(p\alpha,q\beta)\, g_n(\frac{x}{\alpha} - p, \frac{y}{\beta} - q)$ (2')

où les fonctions $g_n(x,y)$ sont à support borné et se ramènent à des produits de deux fonctions $g_{n_1}(x)$ et $g_{n_2}(y)$ dans le cas où le support est un rectangle.

Definition 2 .

On appelera suite d'échantillons, ou forme, ou image numérique, tout nombre fini d'échantillons tels que les equations (2) ou (2') permettent d'obtenir une représentation $\sigma_n(x)$ ou $\sigma_n(x,y)$ d'un signal s(x) ou d'une image s(x,y) respectivement.

Pour être correcte et utilisable, la prise d'information d'une image sur ordinateur demande de recueillir les niveaux de s(x,y) aux sommets d'un réseau approprié de pas 0,2a environ, (15). Cette opération a été effectuée dans le cas du système CALIFE que nous avons utilisé pour numériser des images enregistrées sur des supports photographiques (diapositives, films, etc...).

On remarquera avant de terminer ce chapitre que les échantillons $e(p\alpha,q\beta)$ sont en nombre fini (même si ce nombre peut être très grand), sont eux-mêmes pris dans un ensemble fini, puisque physiquement, on ne peut pas réaliser, ni prélever un nombre infini de teintes sur un support photographique. Nous avons cherché, et nous montrerons comment au chapitre 2, à nous placer dans les conditions optima d'utilisation du système CALIFE en déterminant quel était le support photographiqu le plus adéquat pour l'analyse par CALIFE, et combien de niveaux de gris il était possible d'extraire au maximum de ce support photographique.

CHAPITRE DEUX

ANALYSE DE L'INFORMATION

Dans ce chapitre, nous étudions les caractéristiques des capteurs dans le but de les utiliser au mieux de leurs possibilités, et en particulier dans le but d'éliminer les différents bruits ou distorsions liés à leurs utilisations, et afin de ne retenir que l'information utile au traitement de l'image numérisée. Le premier paragraphe est consacré aux différentes méthodes mises en oeuvre pour étalonner un appareil dont la fonction correspond à celle d'un convertisseur analogique-numérique, afin de bien connaitre la signification des nombres provenant d'une analyse à l'aide d'un capteur donné. Le deuxième paragraphe s'intéresse aux effets sur la numérisation de la variation d'un paramètre de la numérisation (l'ouverture d'analyse peut être modifiée, le filtrage dû à l'échantillonnage dépend du pas), dans le but de permettre d'éliminer de l'information redondante, par déconvolution ou lissage. Le troisième paragraphe est consacré aux méthodes de correction des défauts d'appareil, c'est-à-dire des différentes distorsions inhérentes à l'utilisation d'un appareil donné pour l'analyse; et au filtrage digital mis au point pour éliminer du bruit de fond granulaire en conservant suffisamment d'information uti

I ETALONNAGE D'UN ANALYSEUR D'IMAGE

Dans ce paragraphe, nous décrivons, (9), (18), les différentes mesures "informatiques" qui ont permis de définir les performances des analyseurs flying spot CALIFE 2 et CALIFE 3 du Laboratoire Central de l'Armement. Il va sans dire que les mêmes mesures devront être effectuées sur les autres analyseurs, même de catégories différentes, lorsque ceux-ci seront utilisés en traitement d'images ou reconnaissance des formes. Cela a été fait pour la chaine de numérisation rapide SANDRA du L.C.A. placée en aval d'un système d'enregistrement sur bande vidéo d'un phénomène physique se produisant dans une enceinte fermée, (16). Il est malheureusement difficile dans la plupart des cas de se procurer les étalons nécessaires à ces manipulations : ils doivent avoir été mesurés, ou obtenus, par des appareils plus précis que celui qu'on étalonne. Nous avons surtout cherché à répondre à la question : quelle est la signification des nombres provenant de l'analyse d'une image par un capteur ? Nous voulons établir une correspondance entre l'image numérique, **voir** I-3, et l'image à l'entrée en supposant que l'analyseur est resté stable pendant toute la durée de la numérisation. Les différents paramètres à identifier sont ceux de la géométrie (résolution spatiale et distorsions, etc...) et de la densitométrie (résolution, déformations des niveaux affichés, etc...).

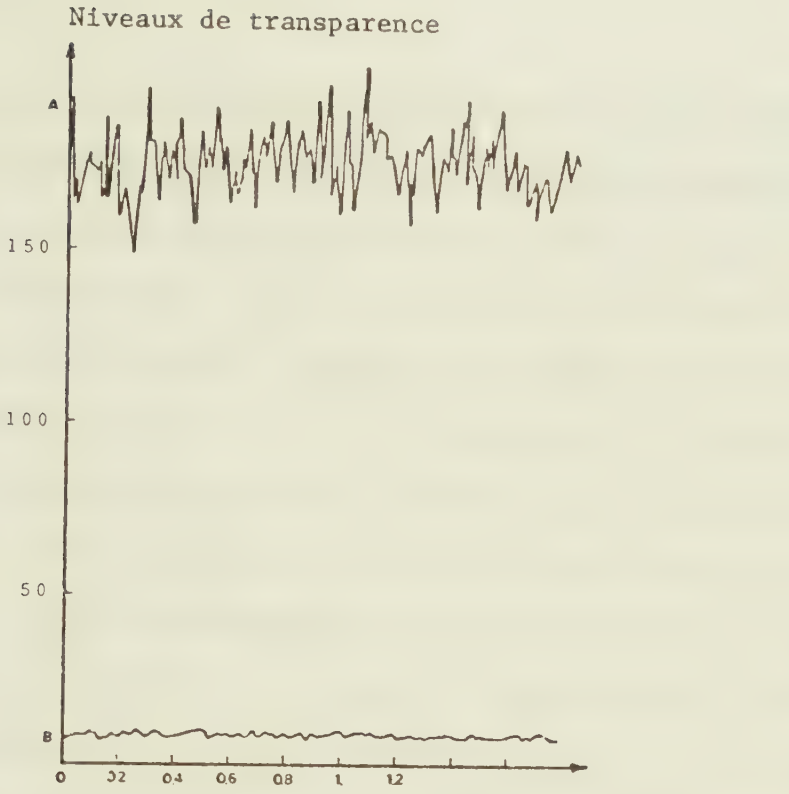
I-a Dynamique .

Examinons les particularités d'une image numérique obtenue par CALIFE 2 ou CALIFE 3. L'amplitude des échantillons comprise théoriquement entre les niveaux 0 et 255 dans le cas où l'information de luminance est convertie sur 8 bits est en pratique comprise entre deux niveaux limites correspondant au noir et au blanc de l'image avant numérisation. La courbe du gamma des photographes en est une cause : ou bien il s'agit d'un cliché positif et le signal blanc donne lieu à une absence

d'impression, et on est alors limité a priori par ce qui correspond à l'émulsion ou bien au contraire, le signal blanc donne lieu à une impression intense (négat et on est limité à la densité maximale des grains d'argent (émulsion complètemen voilée). Les deux limitations en blanc et en noir sont ainsi d'origine photogram métrique. Les appareils d'analyse ont eux aussi des limitations dont nous retien drons la principale : le débit de photons pouvant être produit pour un réglage d de l'appareil n'est pas illimité, nous ne pouvons disposer que d'une certaine qu tité d'énergie à la source. On dira que CALIFE sature dans le blanc ou le noir lorsque les échantillons fournis par l'analyse d'un cliché blanc ou noir sont éq valents (égalité statistique) à ceux fournis par l'analyse d'un cliché plus blan ou plus noir, respectivement.

Ainsi, il convient de régler la gamme de sensibilité d'un appareil à l'aide d deux clichés, noir et blanc, servant d'étalons aux limites. On cherchera à rappr cher le noir du niveau affichable minimum, c'est-à-dire zéro, et le blanc du niv affichable maximum, c'est-à-dire 255, tout en vérifiant que les noirs et les bla plus intenses donnent les mêmes nombres (au sens statistique). On s'aperçoit ain par exemple que la dynamique densitométrique de CALIFE 2 est comprise entre 0 et La densité 2 donne lieu à des nombres voisins de 0 et la densité 0 des nombres voisins de 200. On peut également dire que la sensibilité de l'appareil est très faible aux limites, trop faible pour être perceptible.

En fait, nous avons affaire à deux dynamiques, celle de l'appareil, et celle l'enregistrement (émulsion). Il convient de les mettre en phase pour un bon usag du système. Nous nous sommes continuellement attachés à le faire, et nous suppos pour la suite que c'est dans ces conditions que les images numériques ont été ob tenues.



A. Image numérique d'un filtre de faible densité.
B. Image numérique d'un filtre de forte densité.

Figure 1

I-b Bruit et nombre de niveaux .

L'analyse d'une image a pour résultat pratique de fournir une image numérique entachée d'un bruit complexe, en général non indépendant de l'information utile au traitement de l'image. Le fait d'utiliser un appareil plus précis ne fait que diminuer la présence de ce bruit, sans l'éliminer complètement, aussi devons nous chercher à l'identifier pour en éliminer la partie la plus génante, en contrepartie de la partie la moins utile de l'image numérique. Ce bruit à deux dimensions provient de l'instabilité de la source lumineuse et des grandeurs électroniques propres à l'appareil (bruit d'appareil) auquel s'ajoutent les bruits provenant des imperfections du support de l'enregistrement analysé. Le bruit résultant dépend en général des niveaux de gris de l'image numérique. Une première manière pour l'évaluer con-

siste à numériser des images dont la transparence est constante. Ces images, qu'o appelle des gammes de gris, calibrées ou non, à dépot d'argent ou de carbone, son disponibles chez les fabricants d'émulsions. Malheureusement, les différents gris disponibles ne sont pas très nombreux. On trouve par exemple des gammes dont la densité varie de 0,05 à 3,05 avec un pas de 0,15, rarement de 0,10, avec une erre relative de 10% sur le niveau moyen. Il y aurait beaucoup à développer de ce côté

La méthode que nous avons utilisée pour évaluer globalement le bruit de numéri sation des images est statistique. Nous construisons l'histogramme des transparen ces fournies par l'appareil en tous les points d'une émulsion calibrée. Son allur est gaussienne. Nous lui faisons correspondre une moyenne et un écart-type. La mo ne représente le niveau moyen de l'émulsion de densité constante, et l'écart-type représente le bruit global pour ce niveau moyen. Un exemple de cette expérimenta- tion sur CALIFE 2 est donné à la figure 2. Nous avons ainsi numérisé le maximum de gris différents disponibles dans le commerce en cherchant les plus précis. Les histogrammes correspondant aux densités supérieures à 1,8 environ sont confondus (phénomène de saturation). L'histogramme correspondant à la densité la plus faibl disponible n'atteint pas le maximum affichable, c'est-à-dire 255. On constate éga ment que le niveau de bruit varie avec le niveau. Nous remarquons aussi que l'éca type (ou le niveau de bruit) varie quand l'aire de l'image analysée augmente. Cec est dû aux déformations densitométriques. Nous dirons donc que le bruit global mesuré jusqu'ici est un bruit apparent. Il peut être réduit au bruit réel si l'on est capable de corriger les déformations. Ceci est l'objet des paragraphes II et

Les histogrammes, ou leurs moyennes et écarts-type, obtenus à partir des gamme de gris, permettent de définir le nombre des niveaux différenciés par l'appareil. On donne par exemple le nombre de niveaux discernés à 2 écarts-type près, c'est-à dire, tel que les histogrammes ne se recouvrent aux limites que sur 2% de leur ai c'est un critère pessimiste; ou par exemple, tel que les histogrammes se coupent

mi-hauteur, ce qui est très optimiste. Un nombre fourni en sortie d'appareil peut ainsi être corrélé à un niveau donné avec une certaine probabilité. Une des méthodes d'extraction de contours que nous avons mises au point se sert de cette propriété. Nous l'exposons au chapitre trois. Elle est basée sur la quantification de l'information densitométrique fournie par l'appareil sur le nombre de niveaux statistiquement discernés.

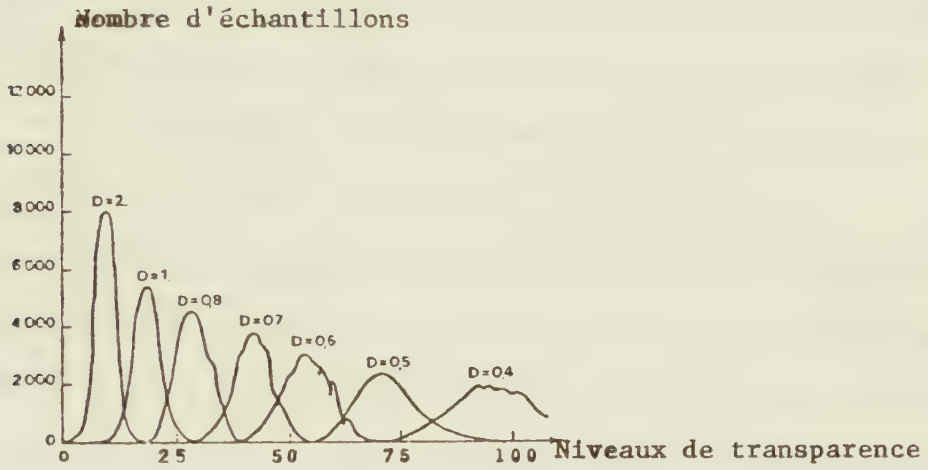


FIG. 2. — *Distributions des images numériques de filtres de densité constante.*

Concluons en remarquant qu'il faut afficher l'information densitométrique sur un nombre suffisant de niveaux pour pouvoir ensuite réduire ce nombre au nombre de niveaux effectivement discernés (nous les avons appellés niveaux principaux) : chaque niveau principal occupe en effet, avec des probabilités variables, un nombre de niveaux affichables autour d'un niveau moyen. Dans le cas des appareils CALIFE, 256 niveaux affichables sont insuffisants, leur sensibilité et leur dynamique nécéssiteraient au moins un affichage sur 10 ou 12 bits. C'est à ce prix que les niveaux principaux correspondant aux gris les plus foncés pourront apparaitre sans que

les nombres affichés laissent croire à une saturation. Les nombres correspondant à ces gris sont en effet très petits sur l'ensemble (0, 255) et peuvent valoir 3 o 4. Le bruit correspondant à ces faibles niveaux doit pouvoir s'étaler sur suffisam ment de niveaux affichables pour être correctement quantifié, et non apparaitre pl élevé qu'il n'est en réalité. Le problème vient du fait que les nombres fournis pa les appareils CALIFE sont reliés plus ou moins linéairement à la transparence. La transparence suit une loi logarithmique. La densité suit une loi linéaire. Une sol tion est d'introduire un amplificateur logarithmique dans la chaîne d'analyse just avant le convertisseur analogique-numérique. Il est malheureusement difficile de réaliser des amplificateurs logarithmiques suffisamment précis.

Ces remarques montrent qu'il faut faire attention à la manière d'exprimer un ré tat de numérisation. Les problèmes de dynamique et de sensibilité d'appareil sont fondamentaux et doivent être résolus dès qu'on veut utiliser de tels nombres. Il f bien en connaitre la signification, c'est-à-dire de quelles grandeurs ils sont la représentation, et avec quelle précision.

I-c Balayage de l'image .

Examinons maintenant comment physiquement l'image est numérisée. Comme elle est mémorisée sur un support rectangulaire limité (24 x 36 mm pour CALIFE), il est pré férable de prendre la valeur des échantillons les uns après les autres. Le chemin géométrique qui passe par tous les échantillons, une seule fois par échantillon, s'appelle balayage. Il est effectué au moyen d'une ouverture (le spot pour CALIFE) qui réalise un filtrage bidimensionnel passe-bas qui dépend de la forme de cette

uverture. L'image continue est échantillonnée selon les directions du chemin suivi. orsque le balayage est séquentiel (numérisation par lignes d'échantillons), une irection est privilégiée par rapport aux autres possibles et l'échantillonnage ui en résulte est en fait un demi-échantillonnage : l'image est numérisée comme n signal unidimensionnel, parallèlement au balayage, avec un pas donné dans la irection du signal, et un autre pas perpendiculaire au balayage (changement de igne). Les lignes voisines à la ligne en cours de numérisation sont partiellement ises en compte, à cause de la forme de l'ouverture. Leur influence sur le résul- at de la numérisation n'est pas négligeable. C'est un effet du filtrage bidimen- ionnel produit par l'ouverture. Nous le détaillons aux paragraphes II et III.

-d Conclusions .

Les remarques faites aux paragraphes précédents montrent l'importance qu'il y a e connaitre les conditions d'enregistrement de l'image, et de numérisation de ette dernière lors de l'analyse par un appareil du type convertisseur analogique- umérique. L'image numérique obtenue peut n'offrir aucune possibilité de traitement certaines précautions n'ont pas été prises. Il faut avoir cherché le support enregistrement (émulsion) le plus adapté au problème à traiter et faire en sorte ue la dynamique de l'enregistrement corresponde bien à celle de l'appareil numéri- eur. Pratiquement ce n'est pas souvent possible, le cas habituel est le suivant : laboratoire fournit des clichés tels quels (pas question de les refaire), et le aboratoire possédant l'appareil numériseur doit l'adapter pour pouvoir les traiter. est ainsi que G. W. STROKE et M. HALIOUA, (32), (33), (34), ont traité optiquement s clichés flous ou bougés pour les restituer avec un maximum de netteté. D'autre rt, les différents paramètres de l'analyse doivent pouvoir être continuellement surés, et pour ce faire, les clichés analysés doivent contenir (ou être accompagnés) gammes de gris, de trames, etc..., qui sont numérisées en même temps que l'image.

L'information numérique qui en résulte est utilisée pour corriger les déformations densitométriques et spatiales, et évaluer les filtrages passe-bas, dûs à l'enregistrement et l'analyse.

II PARAMETRES DE L'ANALYSE D'UNE IMAGE

II-a Filtrage digital .

Par filtre $\mathcal{F}$ nous désignons tout appareil qui donne une réponse $r(x)$ à un signal $s(x)$ placé à l'entrée.

Définition 3 .

Soit un signal $s(x)$ de transformée de Fourier $S(u)$. Un filtre $\mathcal{F}$ est dit filtre linéaire si les deux conditions suivantes sont réalisées :

1) si r_1 et r_2 sont les réponses de s_1 et s_2 et si λ_1 et λ_2 sont des constantes, alors $\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2$ est la réponse de $\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2$,

2) si $r(x)$ est la réponse de $s(x)$, alors $r(x - x_0)$ est la réponse de $s(x - x_0)$.

Utilisons l'analyse impulsionnelle pour prévoir $r(x)$ connaissant $s(x)$. Soit $\gamma(x)$ la réponse de $\mathcal{F}$ à l'impulsion de Dirac $\delta(x)$. On a :

$$r(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(y)\ \gamma(x-y)\ dy$$

Le deuxième membre de cette formule n'est autre que le produit de convolution de $s(x)$ et $\gamma(x)$. On le note : $r(x) = s(x) * \gamma(x)$.

Nous allons voir comment se traduisent ces opérations au niveau du transfert des informations.

Soit $s(x)$ le signal présenté à un filtre linéaire et $\sigma_n(x)$ la représentation utilisant les procédés g_n :

$$\sigma_n(x) = \sum_p s(p)\ g_n(x-p)$$

Supposons que la réponse du filtre linéaire à $g_n(x)$ soit $\rho_n(x)$:

la réponse de $g_n(x-p)$ sera $\rho_n(x-p)$ et la réponse de $\sigma_n(x)$ sera :

$$w_n(x) = \sum_p s(p)\ \rho_n(x-p)$$

Faisons l'hypothèse que $\rho_n(x)$ est représentable par un procédé g_n. Une condition suffisante est que $\rho_n(x)$ ait la même bande que $s(x)$, ou que les supports des bandes du filtre et du signal soient les mêmes.

Alors : $$\rho_n(x) = \sum_q \rho_n(q)\ g_n(x-q) \qquad (3)$$

et en posant : $i = p + q$

$$w_n(x) = \sum_i w(i)\ g_n(x-i) \qquad (4)$$

avec $$w(i) = \sum_p s(p)\rho_n(i-p) = \sum_q s(i-q)\rho_n(q) \qquad (5)$$

Ce sont les formules des filtres digitaux , (2) .

Ces formules n'ont de sens que si $\rho_n(x)$ est représentable par un procédé g_n .

Les équations (5) procurent donc les échantillons w(i) de la réponse en fonction des échantillons s(p) du signal d'entrée, et des échantillons $\rho_n(q)$ de la réponse $\rho_n(x)$ de $g_n(x)$.

Les deux conditions des filtres linéaires se retrouvent : linéarité et indépendan à la translation .

Dans le cas où $g_n = g_0$, on a tout simplement :

$$w_0(x) = \sum_i w(i)\, g_0(x-i) = \sum_i \sum_q s(i-q)\, \rho_0(q) \qquad (6)$$

Nous obtenons une suite de systèmes d'opérations linéaires qu'il nous suffit de résoudre pour obtenir les suites de coefficients $\rho_0(q)$ du filtre digital en fonction d'un signal d'entrée connu (image calibrée) et d'une suite d'échantillons à la sorti (résultat de la numérisation).

Cette formalisation nous permet d'envisager la numérisation d'une image par un appareil comme un filtrage digital, dont les coefficients, ou pondérations seraient une représentation de la transmission de l'ouverture d'analyse.

II-b Transmission de l'ouverture d'analyse .

L'ouverture (le spot dans le cas des capteurs flying spot CALIFE) balaie l'image suivant un certain chemin, et laisse passer une certaine quantité de lumière fonctio de l'information (transparence) portée par l'image à chaque point de ce chemin.

La quantité de lumière transmise dépend de la grandeur (dimensions) de l'ouvertur de sa forme, de son orientation par rapport au balayage, en un mot de sa transmissio (répartition lumineuse dans le cas du spot). La transmision est l'équivalent d'une fonction de transparence de l'ouverture en tout point de cette ouverture. Elle peut être représentée numériquement par des échantillons qu'on appelle habituellement des pondérations. Ce sont les pondérations que pratiquement nous voulons connaitre, et p cela nous avons analysé des images comportant des informations connues.

Soient $\psi(x)$ et h(x) les représentations respectives à une dimension de la réparti de lumière du spot (ou transmission d'une ouverture) et de la transparence de la diapositive à numériser. La réponse en un point de la diapositive s'écrit :

$$\lambda_p = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)\, h(x-p)\, dx = \sum_p \int_p^{p+1} \psi(x)\, h(x-p)\, dx$$

Faisons l'hypothèse que la transparence h(x) de la diapositive est représentable par un procédé g_n , (7) , on a :

$$h(x) = \sum_p h(p)\, g_n(x-p)$$

La réponse s'écrit alors :

$$\lambda_p = \sum_p \int_p^{p+1} \psi(x) \{ \sum_q h(q-p)\ g_n(x-q) \}\ dx$$

Nous disposons d'une diapositive calibrée constituée d'un trait blanc de largeur onnue sur fond noir, et dont la transparence sera représentée par la fonction f(x). ous admettrons que les niveaux du blanc et du noir sont constants et valent respectiement B et N.

Nous avons : $f(x) = N$ pour $x < 0$ et $x > 1$

$f(x) = B$ pour $0 \leqslant x \leqslant 1$

La réponse en un point de la diapositive s'écrit :

$$\sigma_p = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(y)\ f(y-p)\ dy = \int_p^{p+1} \psi(y)\ dy$$

La réponse λ_p devient alors :

$$\lambda_p = \sum_p \sigma_p \{ \sum_q h(p+q)\ g_n(x-q) \} \qquad (7)$$

L'expression (7) indique que la numérisation d'une diapositive peut se représenter ar un filtrage digital.

Faisons l'hypothèse que la répartition du spot $\psi(x)$ est représentable par un procé- é g_n , et en particulier par un procédé g_o . On a :

$$\psi(x) = \sum_p \psi(p)\ g_n(x-p)$$

La réponse s'écrit alors :

$$\sigma_p = \int_p^{p+1} \psi(x)\ dx = \int_p^{p+1} \psi(p)\ g_n(x-p)\ dx$$

'où $\sigma_p = \psi(p) \int_p^{p+1} g_n(x-p)\ dx = \psi(p) \int_\zeta g_n(x)\ dx$

omme $\int_\zeta g_n(x)\ dx = 1$, on a bien : $\sigma_p = \psi(p)$ (8)

Dans le cas où la transparence de la mire est représentée par f(x), la relation (8) st une représentation g_0 des différents coefficients d'un filtre digital. Une telle ire est facilement réalisable, nous avons pris une largeur égale à 10 µm, calibrée 0,5 µm près. Sa numérisation par les capteurs flying spot CALIFE nous a permis d'en onnaitre la répartition lumineuse des spots, exprimée par des échantillons de pondéraion. Un exemple de résultat est donné à la figure 3.

I-c Simplification de l'information analysée .

La simplification du résultat de l'analyse d'une image peut être réalisée à l'aide filtrage digital. On diminue le nombre d'échantillons N en augmentant le pas d'échanllonnage, (15), (17), mais seulement après avoir diminué la borne supérieure de la nde passante à l'aide d'un processus de filtrage. On fait en sorte un deuxième filtra- après celui réalisé par l'ouverture d'analyse, de manière à simuler un filtrage hoc, produit de ces deux filtrages, plutôt que d'essayer de modifier l'ouverture analyse directement.

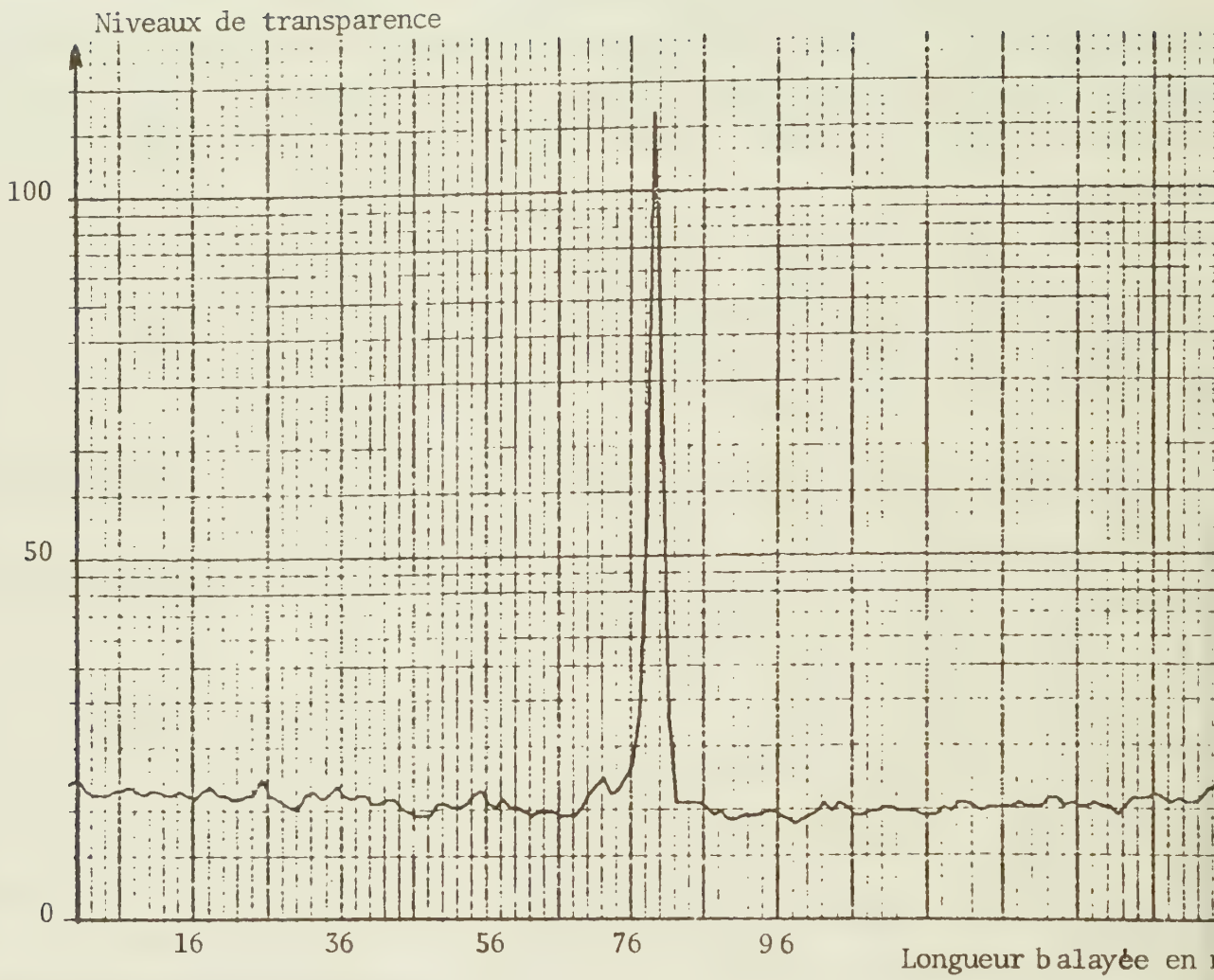


Fig. 3 : Répartition lumineuse du spot de CALIFE 2 .

L'équation (4), II-a, nous fournit w(i) à l'aide des échantillons $\rho_n(q)$ de la ponse impulsionnelle du filtre linéaire $\mathcal{F}$ au signal $g_n(x)$. Soit F(u) la réponse ectrale du filtre $\mathcal{F}$, $R_n(u)$ et $G_n(u)$ les transformées de Fourier de $\rho_n(x)$ et $g_n(x)$; a :

$$R_n(u) = F(u)\, G_n(u) \quad \text{c'est-à-dire} \quad F(u) = \frac{R_n(u)}{G_n(u)} \qquad (9)$$

L'équation (9), dite de déconvolution, permet d'avoir F(u) connaissant $R_n(u)$ et (u), (17), $\rho_n(q)$ étant à support borné, sa transformée de Fourier $R_n(u)$ ne peut être support borné. La condition de filtrage ne peut être satisfaite qu'approximativement.

Les fonctions $g_n(x)$ satisfont assez bien aux conditions requises :

1) elles sont à support borné,

2) leur spectre $G_n(u)$, (15),(20), satisfait aux conditions :

$$G^{(p)}(m) = 0 \quad \text{sauf } G(0) = 1 \quad ; \quad n, m, p \in \quad \text{et} \quad 0 \leqslant p < n$$

trement dit, leur spectre approxime zéro pour $|u| \geqslant 1$

Les filtres du type g_0 sont évidemment les moins efficaces, mais ce sont les plus mples. Nous les avons fréquemment utilisés.

La réponse impulsionnelle $\rho_n(x)$ du filtre linéaire $\mathcal{F}$ au signal $g_n(x)$ est donnée r :

$$\rho_n(x) = \sum_q \rho_n(q)\, g_n(x-q) \qquad (3)$$

l'équation (3) peut s'écrire :

$$\rho_n(x) = \rho_n^*(x)\, g_n(x) \qquad (10)$$

avec :

$$\rho_n^*(x) = \sum_q \rho_n(q)\ \delta(x-q) \qquad (11)$$

$\rho_n^*(x)$ n'est autre que la suite d'échantillons $\rho_n(q)$, ce qu'exprime l'équation (11), l'équation (10) n'est qu'une autre manière d'écrire la relation (3) : $\rho_n(x)$ s'obtient r la convolution de $\rho_n^*(x)$ et $g_n(x)$.

De l'équation (10), on tire :

$$R_n(u) = R^*(u)\, G_n(u) \qquad (12)$$

de l'équation (9), on déduit :

$$F(u) = R_n^*(u) \quad \text{si } |u| < \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad F(u) = 0 \quad \text{si } |u| > \frac{1}{2} \qquad (13)$$

est-à-dire que F(u) n'est autre que le spectre de $\rho_n^*(x)$, avec l'hypothèse que $\rho_n(x)$ t représentable par un procédé g_n. Ce spectre est particulièrement simple :

$$R_n^*(u) = a_0 + \sum_q a_q \cos 2\pi qu + b_q \sin 2\pi qu \qquad (14)$$

ec :

$$a_0 = \rho(0) \qquad a_q = \frac{\rho(q) + \rho(-q)}{2} \qquad b_q = \frac{\rho(q) - \rho(-q)}{2} \qquad (15)$$

Les conditions (13), étendues à deux dimensions deviennent :

$$\begin{cases} F(u,v) = R^*(u,v) & \text{si } |u| \text{ et } |v| < \frac{1}{2} \\ F(u,v) = 0 & \text{si } |u| > \frac{1}{2} \text{ ou } |v| > \frac{1}{2} \end{cases} \qquad (13')$$

On a alors :

$$R^*(u,v) = \sum_{p,q} \rho(p,q)\, e^{2i\pi(pu+qv)} \qquad (14')$$

avec $$\rho(p,q) = \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} F(u,v)\, e^{-2i\pi(pu+qv)}\, du\, dv \qquad (15')$$

Dans le cas où F(u,v) se décompose en un produit, $\rho(p,q)$ se décompose également en un produit. Le problème général du filtrage employant les filtres digitaux se ramène donc à l'approximation d'une certaine fonction requise H(u) ou H(u,v), à l'aide d'un polynome trigonométrique. Le filtrage ne présente d'intérêt que dans la bande où S(u) ou S(u,v) et R(u) ou R(u,v) sont par hypothèse différents de zéro.

II-d Conclusions .

Nous avons expliqué en terme de filtrage digital quel était le résultat de la numérisation d'une image. L'ouverture de l'appareil, représentée à l'aide d'échantillons de pondération, se comporte en fait comme un filtre digital que l'on ne peut pas modifier. Pour modifier le résultat de la numérisation en fonction de critères que l'on se fixe au préalable (lissage, simplification, etc...) il convient donc de former un second filtre digital que l'on mettra en série. Nous obtiendrons ainsi une suite d'échantillons, image numérique lissée, ou simplifiée, dont la bande de fréquence permet de déterminer le pas. De tels filtres ont été calculés et sont présentés au paragraphe III.

III PRETRAITEMENT ET FILTRAGE DIGITAL D'UNE IMAGE NUMERIQUE

L'objet de ce paragraphe est de montrer comment on peut agir sur les valeurs des échantillons de l'image numérique pour en corriger les déformations systématiques, ou pour en fournir une représentation exempte de bruit. La correction des défauts d'appareil fait appel aux résultats de l'étalonnage. Les images numériques obtenues à partir d'images de trames ou de mires de densités constantes permettent de retrouver les coordonnées résultantes d'un certain nombre de points matérialisés à l'entrée par des croisements de traits calibrés,et d'obtenir le profil global du niveau moyen résultant correspondant à un niveau d'entrée affiché. Les déformations aléatoires (bruit) sont lissés à l'aide de filtres digitaux dont il convient de trouver les pondérations les plus adéquates pour cet effet.

III-a Correction des défauts d'appareil .

L'image analysée est positionnée à l'entrée du numériseur; dans le cas où on veut corriger les défauts dûs à l'analyse elle-même, il convient d'analyser les images étalons avec le même positionnement. Le problème du positionnement a été résolu à l'aide de croix repères permettant de régler la platine d'entrée en translation et en rotation, et après numérisation d'établir des correspondances spatiales entre les différentes images.

Les paramètres de référence, déterminés par les noeuds de la trame étalon numérisée juste avant l'image étudiée, permettent de reconstruire la trame fictive de l'image étudiée numérisée ne comportant pas de trame matérialisée. Ceci permet de retrouver les coordonnées réelles de tous les points de l'image. Dans le cas de l'appareil CALIFE et d'une image encadrée par un rectangle calibré, la mesure en coordonnées CALIFE des distances entre les côtés parallèles du rectangle permet de déterminer les pas réels de numérisation.

Exemple d'application : positionnement de masques numériques sur une image comportant une trame fictive, (18) ;

Les caractéristiques de l'image sont les suivantes :

1) l'information à traiter sur le cliché est contenue dans un rectangle calibré de référence dont les dimensions sont respectivement égales à 16 mm et 20 mm ,

2) l'analyse du cliché a été limitée au rectangle et son contenu, avec une bordure de

$8/10^{ème}$ de mm environ, de telle sorte que l'image numérique résultante comporte 1760 x 2170 points avec un pas approximatif de 10 µm .

Le problème consiste à mettre en phase la trame de l'analyse effectuée et la trame de l'image analysée : on veut savoir quel est le point de l'image numérique (exprimé par ses coordonnées en nombre de pas d'appareil) correspondant à un noeud de trame de l'image initiale.

-Exemple numérique(l'image comporte 161 x 201 noeuds de trame) :

1) coordonnées CALIFE :

a) niveau de transparence au point (i,j) : T_{ij} ([0,255]

b) abcisse, ou numéro de colonne : i ∈ [1,1760]

c) ordonnée, ou numéro de ligne : j ∈ [1,2170]

2) coordonnées de la trame de l'image analysée :

a) abcisse, ou numéro de colonne : I ∈ [I_0 , I_0+ 160]

b) ordonnée, ou numéro de ligne : J ∈ [J_0 , J_0+ 200]

c) I_0 et J_0 sont fixées à 8 et 29 respectivement (centrage de l'image sur le support tramé).

Les coordonnées (I,J) doivent être reliées aux coordonnées (i,j), afin de positionner des masques numériques aux noeuds de la trame sur l'image numérique.

3) lors de la numérisation, les quatre sommets du rectangle de référence ont les coordonnées suivantes et ont été pointés aux niveaux de transparence maximum des croisements matérialisant les sommets :

$(I_1 = 8 , J_1 = 29) \iff (i_1 = 37 , j_1 = 86)$

$(I_2 = 8 , J_2 = 229) \iff (i_2 = 36 , j_2 = 2097)$

$(I_3 = 163, J_3 = 29) \iff (i_3 = 1644, j_3 = 86)$

$(I_4 = 168, J_4 = 229) \iff (i_4 = 1643, j_4 = 2099)$

Dans ce cas, le pas horizontal moyen est : $p_H = \frac{1}{2}\left\{\frac{i_3-i_1}{I_3-I_1} + \frac{i_4-i_2}{I_4-I_2}\right\} \# 10{,}06$ µm

le pas vertical moyen est : $p_V = \frac{1}{2}\left\{\frac{j_2-j_1}{J_2-J_1} + \frac{j_4-j_3}{J_4-J_3}\right\} \# 10{,}06$ µm

L'incertitude sur le pas horizontal est : $\Delta p_H = \frac{i_3-i_1}{I_3-I_1} - \frac{i_4-i_2}{I_4-I_2} \# 0{,}03$ µm

L'incertitude sur le pas vertical est : $\Delta p_V = \frac{j_2-j_1}{J_2-J_1} - \frac{j_4-j_3}{J_4-J_3} \# 0{,}01$ µm

Les coordonnées approximatives du noeud (I=47,J=96) seront, pour cette numérisati

$i = (I - I_0) . p_H = 392$

$j = (J - J_0) . p_V = 674$

Le positionnement approximatif des masques numériques ayant été fait, il est maintenant possible d'effectuer le traitement local avec la finesse et la précision souhaitée. Ce point de vue sera repris lors de la détermination des points caractéristiques d'une image au chapitre quatre.

Examinons maintenant le cas des déformations densitométriques dues à l'appareil. Si on examine l'image numérique correspondant à la numérisation d'une mire de densité constante, on se rend compte qu'elle n'est pas plane. De plus, les défauts observés conservent la même position relative d'une numérisation à l'autre, et pour des mires de densités différentes.

Dans le cas de l'appareil CALIFE 2 , des mesures quantitatives sur plusieurs densités nous ont permis de dire que :

a) le niveau est plus faible sur les bords de l'image : la transmission de l'ouverture (fonction de luminance du spot) tient compte du cadre de la photographie analysée. C'est l'équivalent d'une perte de lumière ou d'énergie,

b) l'effet mentionné en a) est par ailleurs dissymétrique : la fonction de luminance du spot n'est pas symétrique , on l'a constaté au moyen d'autres mires, II-b, fig.3, comme celles constituées d'un trait blanc d'épaisseur calibrée sur fond noir (effet Coma),

c) le niveau affiché est nettement plus faible au centre de la photographie, ce qui s'explique par un défaut de luminosité du tube (usure au centre plus souvent utilisé) ou par une mauvaise transmission dans le système optique.

Ces différentes mesures permettent d'effectuer des corrections géométriques de la déformation densitométrique ainsi mise en évidence : l'étude des numérisations des différentes densités montre qu'en première approximation, on peut considérer les effets a) , b) et c) comme proportionnels à l'amplitude du signal.

Nous avons d'autre part admis que le niveau correct pour une densité constante était le niveau moyen réellement obtenu, ce qui nous a permis de faire des corrections en prenant comme référence la densité la plus faible, c'est-à-dire le niveau le plus élevé.

Formules de correction :

soient : NM le niveau noyen de la référence,
B le niveau d'un point de la référence,
P le niveau du point correspondant de la photographie,
PC le niveau du point correspondant de la photographie corrigée.

- formule 1 : $PC_1 = P.(2.NM - B) / NM = P.(2 - B/NM)$
- formule 2 : $PC_2 = P.NM / B$

Comme les niveaux sont des entiers, les corrections apportées par l'une ou l'autr des deux formules sont équivalentes. L'expérience le vérifie.

Résultats de la correction :

a) la correction est effectuée après un double filtrage digital des images numérique (nous en verrons le détail plus loin, III-b), le niveau du bruit résiduel est alors de l'ordre de 1,

b) après correction, il y a amplification du bruit (de l'ordre de 3), mais la déform tion résiduelle est de l'ordre de 1,

c) il y a amorce d'une plus grande différenciation des niveaux : l'analyse des histo grammes des images corrigées montre qu'il est possible de séparer plus de niveaux après correction qu'avant. On introduit de cette manière les notions de nombre de niveaux apparents d'un appareil (analyse des histogrammes densitométriques avant corrections) et de nombre de niveaux réels d'un appareil (analyse des histogrammes après corrections),

d) l'avantage de ces méthodes de correction est qu'elles sont autoadaptatives; elles ne nécessitent pour leur mise en oeuvre que la numérisation d'un échantillon du support non impressionné de l'image, avant la numérisation de l'image étudiée.

III-b Filtrage digital d'images numérisées .

Un filtre digital, représenté par Q_0 échantillons (ou pondérations) portera sur Q_0 échantillons de l'image numérique, et lui fera correspondre un échantillon à la sortie. L'opération de filtrage digital est répétée n x p fois, n et p correspondant au nombre des points des lignes et des colonnes composant l'image numérique filtrée.

Si on veut éliminer les parasites, c'est-à-dire du bruit à haute fréquence sur l'image initiale (problème général du lissage), le filtre à choisir est un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure doit se trouver le plus près possible des basses fréquences; d'autre part, le nombre (n x p) des points nécessaires pour représenter l'image filtrée est une fonction des fréquences de sortie. Nous avons déjà indiqué, chapitre un III, comment pouvait être utilisé le théorème de Nyquist-Shannon pour le calcul du nombre d'échantillons nécessaires pour représenter un phénomène dont les fréquences sont

onnues. Il reste à déterminer l'effet des filtres digitaux, au sens des fréquences, ur les images numériques placées à leur entrée. Nous avons cherché à comparer la ortie avec l'entrée, et c'est ainsi que la notion de fonction de gain d'un filtre igital a été introduite, (6). Les images numériques que nous avons simulées sont le la forme :

$$\{e_{n,m} = \sin \frac{2\pi n}{T_1} \sin \frac{2\pi m}{T_2}\} \qquad n \in [1, N] \ , \quad m \in [1, M] \ ,$$

T_1 et $T_2 > 2$.

Dans le cas où l'étude des filtres est faite à 1 dimension, les images numériques imulées deviennent : $\{e_k = \sin \frac{2\pi k}{T}\}$ $k \in [1, n]$ et $T > 2$.

Voyons l'effet d'un filtre digital défini par Q_0 échantillons $\{\rho(q)\}$ sur la forme $\{e_k\}$ précedemment introduite ; on a à la sortie :

$$s_k = \sum_{q=-Q}^{q=+Q} \rho(q) \sin \frac{2\pi(k-q)}{T} \qquad \text{où } Q_0 = 2Q+1 \ ,$$

ou $$s_{k+\frac{1}{2}} = \sum_{q=-Q+\frac{1}{2}}^{q=+Q+\frac{1}{2}} \rho(q) \sin \left((k+\tfrac{1}{2})\tfrac{2\pi}{T} - \tfrac{2\pi q}{T}\right) \ , \text{ où } Q_0 = 2Q \ .$$

Les réponses s'écrivent, selon les cas :

$$s_k = \left(\sum_{q=-Q}^{q=+Q} \rho(q) \cos \frac{2\pi q}{T} \right) \sin \frac{2\pi k}{T} + \left(\sum_{q=-Q}^{q=+Q} \rho(q) \sin \frac{2\pi q}{T} \right) \cos \frac{2\pi k}{T}$$

et $$s_{k+\frac{1}{2}} = \left(\sum_{q=-Q+\frac{1}{2}}^{q=+Q-\frac{1}{2}} \rho(q) \cos \frac{2\pi q}{T} \right) \sin(k+\tfrac{1}{2})\frac{2\pi}{T} + \left(\sum_{q=-Q+\frac{1}{2}}^{q=Q-\frac{1}{2}} \rho(q) \sin \frac{2\pi q}{T} \right) \cos(k+\tfrac{1}{2})\frac{2\pi}{T}$$

Le deuxième terme du second membre de ces équations représente un facteur de phase qui disparait lorsque le filtre digital est symétrique.

On a alors :

$$s_k = g \sin \frac{2\pi k}{T} \quad \text{où} \quad g = \frac{s_k}{e_k} = \sum_q \rho(q) \cos \frac{2\pi q}{T}$$

et $$s_{k+\frac{1}{2}} = g \sin \frac{2\pi(k+1/2)}{T} \quad \text{où} \quad g = \frac{s_{k+1/2}}{e_{k+1/2}} = \sum_q \rho(q) \cos \frac{2\pi q}{T}$$

La fonction g apparait ainsi comme un facteur d'affaiblissement de la forme introduite à l'entrée du filtre digital. Il importe de déterminer son graphe en fonction de ses différentes variables qui sont les pondérations du filtre et la période (ou son inverse la fréquence).

Dans le cas de l'image numérique à deux dimensions, la fonction g, que l'on appellera fonction de gain, s'écrit :

$$G = \frac{1}{\rho(0,0)} \{\rho(0,0) + 2 \sum_{1}^{Q} \rho(0,q) \cos \frac{2\pi q}{T_1}\} \cdot \{\rho(0,0) + 2 \sum_{1}^{Q} \rho(p,0) \cos \frac{2\pi p}{T_2}$$

avec $\rho(p,q) = \frac{\rho(0,q)\ \rho(p,0)}{\rho(0,0)}$

dans le cas où le filtre digital est symétrique par rapport à ses médianes et ses diagonales, et où le nombre de pondérations d'une médiane est impair.

La fonction G apparait comme le produit orthogonal de deux fonctions de gain à un dimension. Dans le cas où le filtre digital, qui peut ne pas être carré, n'est pas symétrique par rapport aux diagonales, la fonction de gain ne se décompose pas en un produit de deux fonctions de gain à une dimension, mais on l'obtient facilement, puique le terme de phase disparait.

Lorsque le terme de phase subsiste, les fonctions de gain ne s'expriment pas facilement, nous ne les avons pas étudiées dans ce cas.

Le lecteur trouvera dans (6) des calculs faits dans le cas où le nombre des pondérations est fixé, et où on cherche à les déterminer en fonction d'une fréquence de coupure que l'on veut maximiser. Ces calculs dépendent des bornes que l'on fixe à la fonction de gain.

Un filtre a été couramment utilisé pour nos travaux, parce qu'il était simple, et qu'il était proche de l'optimum au sens suivant : ses fréquences de coupure sont proches des fréquences de coupure maximum pour une fonction de gain astreinte à rest comprise entre 0 et 1/2. Il s'agit du filtre d'allure torique représenté par les pondérations suivantes :

$$f_1 = \frac{1}{36} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

sa fonction de gain s'écrit :

$$G_1 = \frac{1}{9}\left(2\cos\frac{2\pi}{2\lambda} + \cos\frac{\pi}{2\lambda}\right).\left(2\cos\frac{3\pi}{2\mu} + \cos\frac{\pi}{2\mu}\right)$$

vec $\lambda = \frac{T_1}{2}$ et $\mu = \frac{T_2}{2}$

Comparons le filtre d'allure torique $\mathcal{F}_1$ avec le filtre d'allure gaussienne $\mathcal{F}_2$ btenu par permutation des pondérations $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{8}$. La fonction de gain du filtre $\mathcal{F}_2$ 'écrit :

$$G_2 = \frac{1}{9}\left(\cos\frac{2\pi}{2\lambda} + 2\cos\frac{\pi}{2\lambda}\right).\left(\cos\frac{3\pi}{2\mu} + 2\cos\frac{\pi}{2\mu}\right)$$

Le filtre $\mathcal{F}_1$ est plus adapté que le filtre $\mathcal{F}_2$ au lissage du bruit granulaire des mages. A première vue, intuitivement, c'est pourtant le contraire que l'on croit evoir être. Comparons les filtres $\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_2$ au sens des fonctions de gain.

lorsque $\lambda = \mu$ (bruit granulaire circulaire)

$$\begin{cases} G_1 = \left\{\frac{1}{3}\left(2\cos\frac{3\pi}{2\lambda} + \cos\frac{\pi}{2\lambda}\right)\right\}^2 \to 1 \quad \text{quand} \quad \lambda \to \infty \\ G_2 = \left\{\frac{1}{3}\left(\cos\frac{3\pi}{2\lambda} + 2\cos\frac{\pi}{2\lambda}\right)\right\}^2 \to 1 \quad \text{quand} \quad \lambda \to \infty \end{cases}$$

lorsque $\lambda \to \infty$ (bruit ondulé à une dimension)

$$\begin{cases} G_1 = \frac{1}{3}\left(2\cos\frac{3\pi}{2\mu} + \cos\frac{\pi}{2\mu}\right)^2 \to 1 \quad \text{quand} \quad \mu \to \infty \\ G_2 = \frac{1}{3}\left(\cos\frac{3\pi}{2\mu} + 2\cos\frac{\pi}{2\mu}\right)^2 \to 1 \quad \text{quand} \quad \mu \to \infty \end{cases}$$

En pratique, le bruit de fond d'une image numérique est constitué de granules 'allure elliptique dont les dimensions varient continuellement. Le filtre à retenir st celui qui en moyenne les affaiblit le plus, c'est-à-dire, le filtre $\mathcal{F}_1$ puisque $_1 > G_2 \; \forall \; \lambda \; , \; \mu$.

Pour pouvoir chiffrer l'efficacité du filtre $\mathcal{F}_1$ par rapport à $\mathcal{F}_2$, en terme de aille de grain filtré, fixons la borne correspondant aux périodes de coupure $\lambda_u = \mu_u$ $G = 0,5$.

On a pour $\mathcal{F}_1$: $\left\{\frac{1}{3}\left(2\cos\frac{3\pi}{2\lambda_{u_1}} + \cos\frac{\pi}{2\lambda_{u_1}}\right)\right\}^2 = \frac{1}{2}$ d'où $\lambda_{u_1} = 5,0$

On a pour $\mathcal{F}_2$: $\{\frac{1}{3}\left(\cos\frac{3\pi}{2\lambda_{u_2}} + 2\cos\frac{\pi}{2\lambda_{u_2}}\right)\}^2 = \frac{1}{2}$ d'où $\lambda_{u_2} = 3{,}6$.

Concluons en remarquant que le bruit ondulé à une dimension est moins filtré que le bruit granulaire, puisque la périodicité du bruit ondulé filtré vient en solution d'une fonction de gain à la puissance 1, tandis que la taille du grain filtré vient en solution d'une fonction de gain à la puissance 2.

Si l'on fixe la borne G = 0,5 , on a :

pour $\mathcal{F}_1$: $\frac{1}{3}\left(2\cos\frac{3\pi}{2\lambda'_{u_1}} + \cos\frac{\pi}{2\lambda'_{u_1}}\right) = \frac{1}{2}$ d'où $\lambda'_{u_1} = 3{,}7$

pour $\mathcal{F}_2$: $\frac{1}{3}\left(\cos\frac{3\pi}{2\lambda'_{u_2}} + 2\cos\frac{\pi}{2\lambda'_{u_2}}\right) = \frac{1}{2}$ d'où $\lambda'_{u_2} = 2{,}8$.

La différence entre λ_{u_1} et λ'_{u_1} (ou celle entre λ_{u_2} et λ'_{u_2}) montre l'intérêt des filtres digitaux à deux dimensions pour l'extraction d'informations dimensionnelles (à une dimension) dans un fond bruité (à deux dimensions). Le bruit à deux dimension est plus filtré que le signal à une dimension, ce dernier ressort donc plus facileme ces filtres ont donc été systématiquement utilisés pour le prétraitement des images numérisées en reconnaissance des formes.

BIBLIOGRAPHIE DES CHAPITRES UN ET DEUX

(1) GUIHO G. "Représentations et traitements de surface sur ordinateur" , thèse de 3ème cycle , Paris , avril 1969 .

(2) KAISER J. F. "Digital filters" , System analysis by digital computer , edited by Franklin K. KUO and James F. KAISER , John Wiley and Sons Inc. , New York, London, Sydney, 1966, pp. 218 à 285 .

(3) MARCUS J. "Echantillonnage et quantification" , Collection "La physique dans l'industrie et au laboratoire" , Gauthier-Villars , Paris, 1965 .

(4) NATHAN R. "Digital Video-Data Handling" , technical report n° 32877 , Jet Propulsion Laboratory , Californian Institute of Technology, 1966 .

(5) NATHAN R. "Picture enhancement for the Moon, Mars and Man" , Picturial Pattern Recognition, edited by CHENG, LEDLEY, etc... THOMSON, 1968 , pp. 239 à 266 .

(6) KAHN E. "Le filtage digital", thèse de 3ème cycle, Paris, déc. 1970 .

(7) SIMON J.-C., AUBINEAU J.-P. "Représentation d'un signal à spectre borné", note présentée par PONTE M. , comptes rendus de l'Académie des Sciences , pp. 1290 à 1293 , 28 mai 1969, série A .

(8) ESTOURNET D. "Informations d'images, analyse, transmission, traitement", Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, 1970 .

(9) KAHN E. "Un système d'analyse optique : le CALIFE , première partie : l'étalonnage" , Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, 1972, tome 3, n°4, pp. 209 à 215 .

(10) BUTAUX J., LEBOUCHER E., LENNUIER R. "Utilisation des déformations introduites par les appareils de mesure en vue d'obtenir certaines informations sur le signal vrai", Nouvelle Revue d'Optique Appliquée , 1971, tome 2, n°5 .

(11) SIMON J.-C., GUIHO G. "Picture representation and tranformation by compute
Pattern Recognition, 1971, tome 3, pp. 169 à 178 .

(12) DUNNE J. A. "Mariner 1969 Television Image Processing", Pattern Recognitio
1970, tome 2, pp. 261 à 268 .

(13) NOURISSAT Y. "L'analyseur d'images CALIFE" , L'Onde Electrique, 1969, tome
n°8, pp. 869 à 873 .

(14) SIGELLE R., MERLIVAT J.-C. "Les applications de l'informatique aux instrume
d'analyse physico-chimique", Automatisme, 1971, tome 16, n°s 8-9, pp.443

(15) SIMON J.-C., CHECROUN A. "Procédés de filtrage numérique d'une image de lig
Automatisme, 1972, tome 17, n°3, pp. 92 à 102 .

(16) KAHN E., NOURISSAT Y., VIGUIER P. "Acquisition et traitement de cinéradiogr
ultarapides", Proceedings of the 10th International Congress for High Spe
Photography, 1972, pp. 198 à 202 .

(17) CHECROUN A. "Reconnaissance des formes par un ordinateur", thèse d'Etat, P
1972 .

(18) KAHN E. "Traitement automatique des images appliqué aux photographies
circuits imprimés dessinés à la main", L'Onde Electrique, à paraître .

(19) ROCHE C., KAHN E., TROGNON J. "Un centre de traitement digital des images :
capteurs, ses méthodes" , Bulletin de la Société Française de Photogramm
n°52, oct. 1973, pp. 8 à 21 .

(20) EL MALLAWANY I. "Le filtrage numérique", Annales de Télécommunications, tom
n°s 3-4, 1969, pp. 89 à 112 .

(21) HUNT B. R. "Digital Image Processing", Proceedings of the IEEE, 1975, vol
n°4, pp. 693 à 708 .

(22) STOCKAM G. T., CANNON T. M., INGEBRETSEN R. B. "Blind Deconvolution through
Digital Signal Processing", Proceedings of the IEEE, 1975, vol 63, n°4, p
678 à 692 .

23) OPPENHEIM A., SCHAFER R., STOCKAM T. "Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals", Proceedings of the IEEE, 1968, vol 56, n°8, pp. 1264 à 1291 .

24) HUNT B.R., BREEDLOVE J. R. "Scan and Display considerations in processing images by digital computer", IEEE Transactions on Computers, Aug. 1975, pp. 848 à 853 .

25) IEEE Transactions on Computers (Special Issue on Two dimensional digital signal processing), vol C-21, pp. 633 à 836, July 1972 .

26) Proceedings of the IEEE (Special Issue on Digital Picture Processing), vol 60, pp. 766 à 922, July 1972 .

27) CANNON T. M. "Digital image deblurring by non linear homomorphic filtering", PhD thesis, 1974, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112 .

28) KOWALISKI P. "Information Recording and Transfer", Applied Photographic Theory, ch.4, pp. 298 à 339, John Wiley and Sons, 1972 .

29) YU F. T. S., TAI A. "Information leakage through a passive optical channel", Optics Communications, vol 14, n°1, May 1975, pp. 51 à 55 .

30) CROCE P. "Sur l'évolution du rapport signal sur bruit dans la déconvolution quand le bruit est fonction du signal, en particulier pour des récepteurs parfaits", Optics Communications, vol 14, n°2, pp. 271 à 273, June 1975.

31) HUMPHREY N. K. "Les illusions visuelles", La Recherche, n°25, juillet-aout 1972, vol 3, pp. 631 à 638 .

32) STROKE G. W., HALIOUA M. "A new method for rapid realisation of the high-resolution extended-range holographic image deblurring filter", Phys. Letters, 39A, pp.269 à 270, 1972 .

33) HALIOUA M. "Amélioration de l'imagerie par déconvolution holographique en microscopie électronique cohérente et partiellement cohérente de haute résolution", thèse d'Etat, Orsay, 1974 .

(34) STROKE G. W. "Optical Computing", IEEE Spectrum, vol 9, n°12, déc. 1972 pp. 24 à 41 .

(35) STROKE G. W., HALIOUA M., SRINIVASAN V., SHINODA M. "Retrieval of good image from accidentally blurred photographs", Science, vol 189, July 1975, pp. 261 à 263 .

(36) COLE E. R. "The removal of unknown image blurs by homomorphic filteri PhD thesis, 1973, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112 .

(37) Traitement des images, Table ronde du 17 janvier 1974, organisée par le Comité français de télévision et de vidéonique, 36 rue des Alouettes, Paris 19ème

(38) Actes des journées sur le traitement des images organisées par le Centre Natio d'Etudes Spatiales au C.N.R.S., 13-15 déc. 1972, Paris.

(39) ARNHEIM R. "Art and visual perception, a psychology of the creative e the new version, University of California Press, Berkeley and Los Angeles 1974.

(40) BERNSTEIN R., FERNEYHOUGH D. G. JR. "Digital image processing", Photogramme Engineering and Remote Sensing, vol 41, n°12, déc. 1975, pp. 1465 à 1476

(41) KRAMER H. P., BRUCKNER J. B. "Iterations of a nonlinear tranformation for en hancement of digital images", Pattern Recognition, vol 7, n°s1-2, pp. 53 58, 1975 .

(42) BERNSTEIN R. "Digital image processing of earth observation sensor data" IBM Journal of Research and Development, vol 20, n°1, jan. 1976, pp. 40 à

(43) PALMIERI G. "Image devices for pattern recognition", Pattern Recogniti vol 3, 1971, pp. 157 à 168 .

(44) Pattern Recognition (Special Issue on Image Enhancement), vol 2, n°2, 1970 .

(45) Pattern Recognition (Special Issue on Pattern Recognition in Photogrammetry), vol 2, n°4, 1970.

(46) GOODEL W. V. "Image processing in medecine : a summary of the state of the art", Automedica, voll, n°1, 1974, pp.19 à 28.

(47) BERNSTEIN R. "Digital processing of earth observation imagery", IFIP Congress 1974, vol 4, pp.733 à 737.

(48) UNDERWOOD S. A., WILLIAMS D. H., COSTA P., AGGARWAL J. K. "A flying spot scanner system", Texas Univ. at Austin, TR-164, déc. 1974.

(49) KAPLAN M. M., DIAMENT P., TROLL J.H. "Improved image processing", Columbia Univ., New York, College of Physicians and Surgeons, fév. 1975, RADC-TR75-48 .

(50) ROSENFELD A. "Picture processing : 1974", Maryland Univ., College Park, jan. 1975, TR-346.

(51) EKLUNDH J. O. "A system for input and output of digital pictures", Research Inst. of National Defence, Stockholm, Suède, nov. 1972, FOA-2-C-2573-E1 .

(52) DANIELSON R. E. "Application of digital computer techniques to rectification and enhancement of astronomical images", Princeton Univ. Observatory, New Jersey, nov. 1974, NASA-CR-140701 .

(53) ASSEFI T. "Two-dimensional signal processing with application to image restoration", JPL, California Inst. of Tech., Pasadena, sept, 1974.

(54) PRATT W. K. "Image processing research", Univ. of Southern California, Los Angeles, sept. 1974.

(55) MOIK J. G. "Introduction to computer image processing", NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, oct. 1973.

(56) THOMPSON B. J., DEVELIS J. B. "Electrooptics principles and applications", Proceedings of the Society of Photooptical Instrumentation Engineers, vol 38, 30 avril-1er mai 1973, Boston, Massachussets.

(57) KAZAN B. "Advances in image pickup and display", vol 1, Academic Press, New York, London, 1974.

(58) BIBERMAN L. M., NUDELMAN S. "Photoelectronic imaging devices", vol 2, Plenum Press, New York, London, 1971.

(59) SCHAFFERT R. M. "Electrophotography", The Focal Press, London, New York, 1965.

(60) WHITE D. R. "Electrophotography", Second International Conference sponsored by the Society of Photographic Scientists and Engineers, 1974.

(61) COX R. J. "Non silver photographic processes", Proceedings of the Symposium, Oxford, sept. 1973, Academic Press, 1975.

(62) Special Issue on thick and thin films for electronic applications, Proceedings of the IEEE, vol 59, n°10, oct. 1971.

(63) INGEBRIGTSEN K. A. "Piezoelectric surface wave devices", in Solid state devices 1971, pp.17-30, edited by the Institute of Physics, London and Bristol.

(64) KAMINOW I. P. "An introduction to electrooptic devices", Academic Press New York, 1974.

CHAPITRE TROIS

EXTRACTION DE CONTOURS

Les problèmes que l'on rencontre dès qu'on aborde la question de l'extraction de contours sur une image dépendent de la nature de l'information recherchée. Il s'agit dans un premier cas de suivre différents tracés sur une image noir et blanc en vue d'établir un fichier des courbes correspondantes, ou de fournir une mesure; dans un deuxième cas de suivre des lignes de contraste entre les différentes zones d'une image de teintes en vue d'identifier des objets, ou d'effectuer des mesures. Le plus souvent, on essaie, dans le second cas, de se ramener au premier cas, c'est-à-dire, on cherche à passer d'une image de teintes à une image de traits, celle-ci étant considérée comme plus facile à traiter, parce que contenant moins d'information.

Dans ce chapitre, nous traitons principalement du problème de la transformation d'une image de teintes en une image de traits dans le but de reconnaitre des formes, mais aussi d'effectuer des mesures. La simplification de l'image de traits obtenue de cette manière fait l'objet du chapitre quatre. Nous abordons également le cas où l'information recherchée est à extraire d'une image bruitée, noir et blanc pour l'oeil, mais en fait telle que les niveaux de transparence déclarés noir ou blanc présentent des variations importantes.

I EXTRACTION DE TRACES OU DE TRACÉS

Le problème de l'extraction de contours se divise en deux cas, selon la nature de l'image de teintes analysée. Dans le premier cas, celui que nous étudions dans ce paragraphe, il s'agit d'une image comportant des tracés, ou des traces que l'on veut restituer selon un procédé numérique. Les tracés sont par exemple plus ou moins noirs sur un fond plus ou moins blanc, mais se voient mieux que les traces. On dit alors que l'image de teintes est une image de tracés (ou de traces), et le but que l'on se propose d'atteindre est de fournir l'image de traits correspondante, définie par des séries de nombres, utilisables par une machine à tracer par exemple.

Dans le deuxième cas, l'image de teintes se décompose en un certain nombre de régions délimitées par des contours que l'on veut également restituer numériquement sous la forme d'une image de traits. L'étude de ce cas est exposée au deuxième paragraphe.

I-a Extraction de traces dans un fond bruité .

Le premier problème traité a été celui de l'extraction d'informations dimensionnelles sur l'image de la figure 4. Cette image est l'image d'une fente, cinéradiographie d'une sphère métallique creuse en cours d'implosion, (16). Les deux traces visibles à l'oeil définissent un diamètre moyen de la sphère. Le problème est de restituer automatiquement les deux diamètres, intérieur et extérieur, de la sphère au cours du temps avec une grande précision.

Sur l'analyse densitométrique perpendiculaire à l'axe des temps, c'est-à-dire le long d'une isochrone, figure 5, on note la présence de quatre points caractéristiques. Deux sont figurés par les maxima, et leur distance représente le diamètre intérieur, les deux autres sont figurés par les sommets des angles formés par le bruit de fond (1^{er} côté) et l'augmentation rapide de niveau (2^{e} côté), leur distance représente le

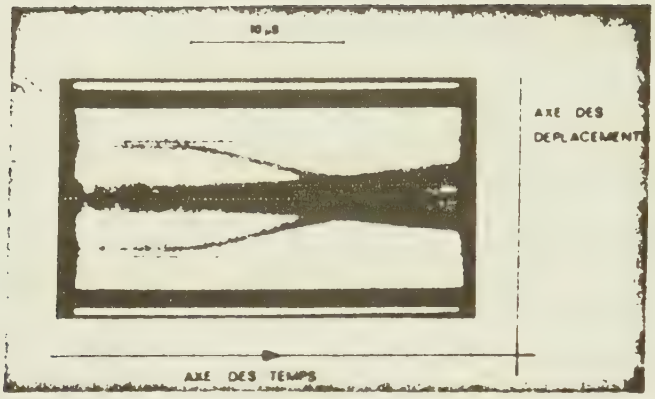


Figure 4-a : Cinéradiographie fente de l'implosion d'une sphère métallique creuse.

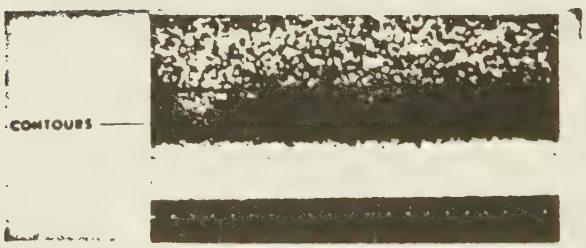


Figure 4-b : Agrandissement d'une partie de la figure 4-a.

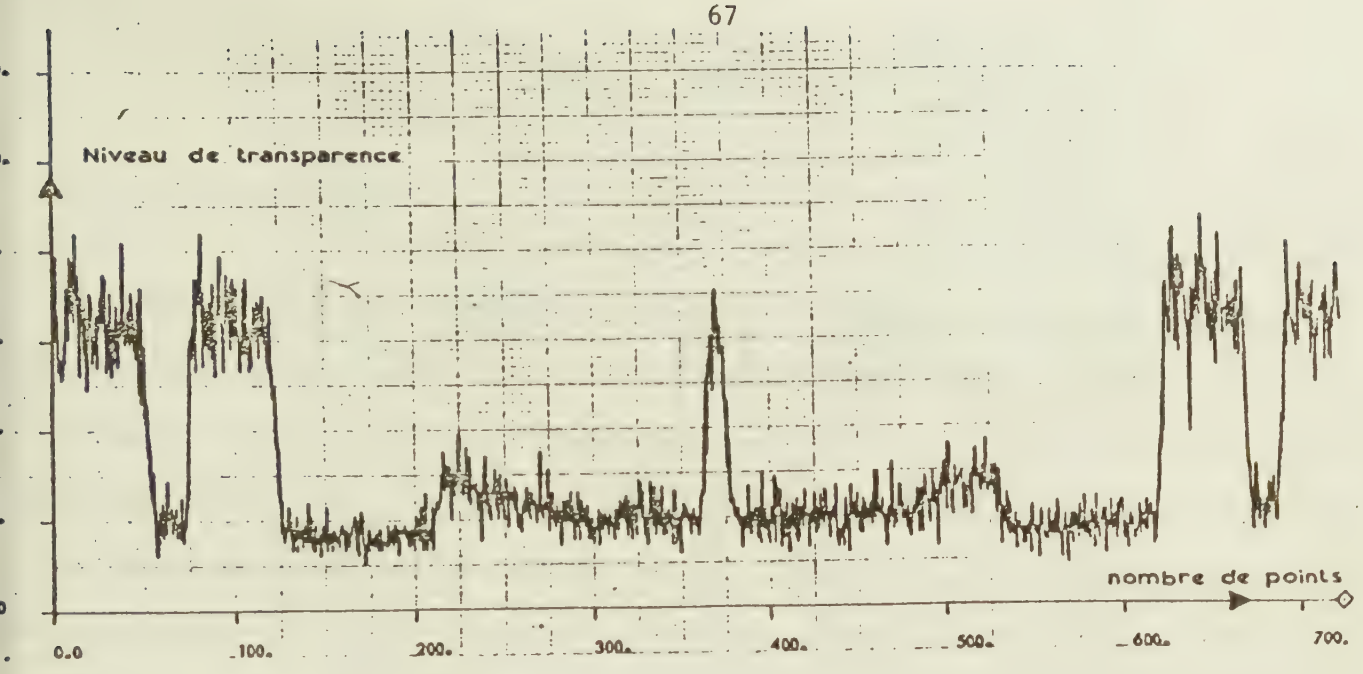


Figure 5-a : Analyse densitométrique perpendiculaire à l'axe des temps de l'image, figure 4, numérisée par le système CALIFE.

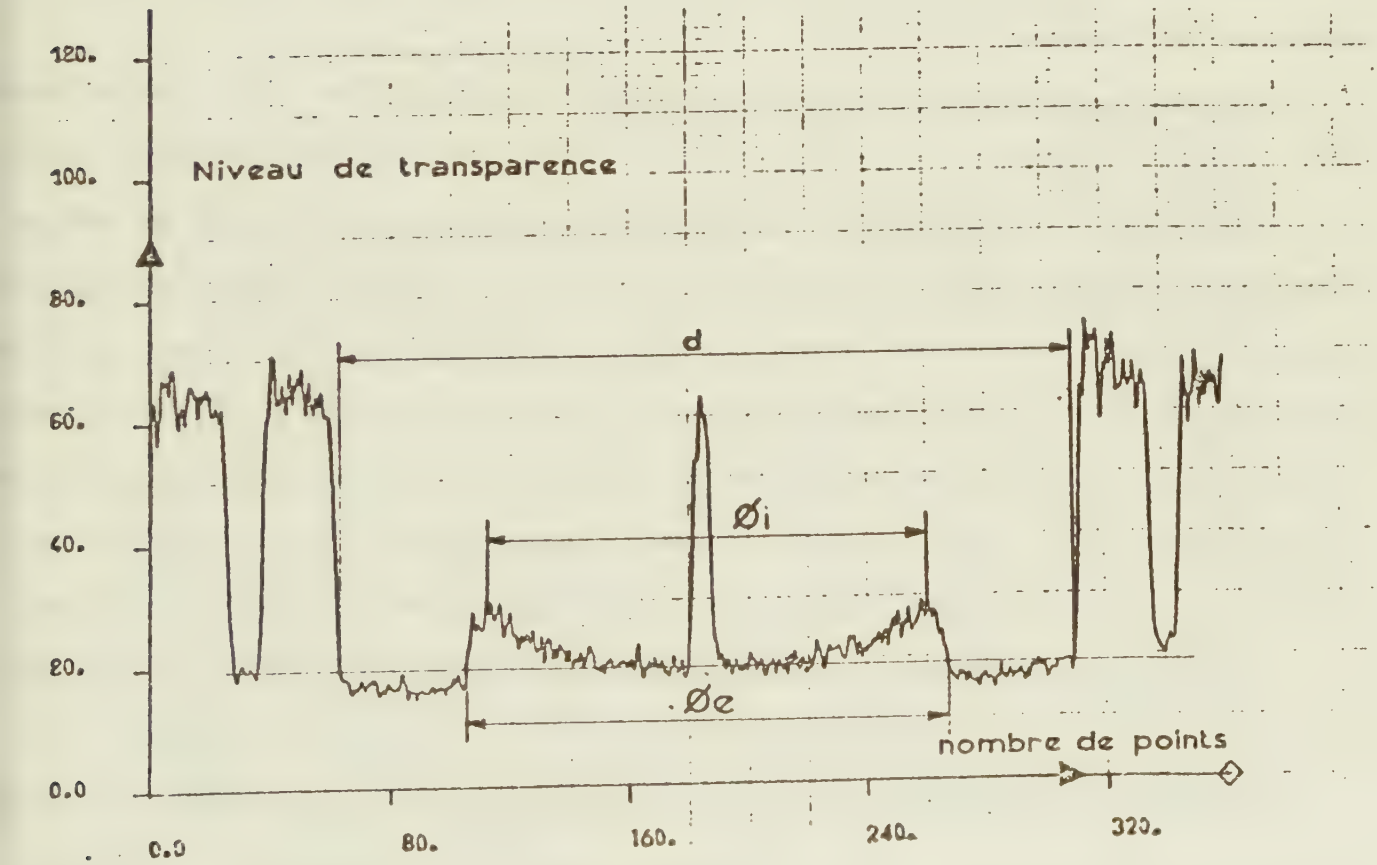


Figure 5-b :Courbe densitométrique perpendiculaire à l'axe des temps de l'image, figure 4, numérisée par le système CALIFE, puis filtrée.

diamètre extérieur.

Il s'agit donc, pour restituer les diamètres, d'extraire les quatre points caractéristiques sur chaque isochrone balayée. Les isochrones sont matérialisées par trois taches émises par le système d'enregistrement. Leur position sur l'image est c ractérisée par leur maxima de densité. La ligne analysée est celle qui se rapproche le plus de la moyenne des trois lignes perpendiculaire à l'axe des temps dessinées à partir du point de densité maximum de chaque tache. Une autre distance est égaleme mesurée sur l'isochrone ainsi définie. Elle représente le grandissement du système d'enregistrement au cours du temps. Il s'agit d'une distance de référence, matériali par deux bandes noires placées à une distance fixe et enregistrée par le système. La distance entre ces deux bandes est mesurée sur chaque isochrone. Les deux points qui la matérialisent sont situés à mi-hauteur entre le bruit de fond et le niveau maximu donné par les bandes.

Pour plus de précision, et d'efficacité dans l'extraction des quatre points carac téristiques, l'isochrone ayant été déterminée, et la mesure de la distance de référence exécutée, il a fallu procéder à des opérations de filtrage digital sur chaque isochrone, afin d'éliminer le bruit granulaire qui brouillait la détection des point caractéristiques. Les filtres utilisés sont ceux proposés au chapitre deux. Il s'agi des filtres dits toriques définis par 4 x 4 pondérations. Ils ont l'avantage d'affai le niveau des grains d'un ordre de grandeur relatif égal au carré par rapport à l'af faiblissement qu'ils occasionnent aux traces. Les isochrones filtrées ont donc été définies par quatre lignes d'échantillons autour de la moyenne tracée à partir des trois taches les matérialisant. C'est sur les isochrones filtrées que les mesures ont été faites et se sont révélées satisfaisantes.

On notera que la méthode d'extraction présentée ci dessus s'est révélée tout auss efficace dans le cas où l'image a été enregistrée par un autre système. L'analyse densitométrique fournit alors des courbes différentes, figure 6, mais elles possèdent

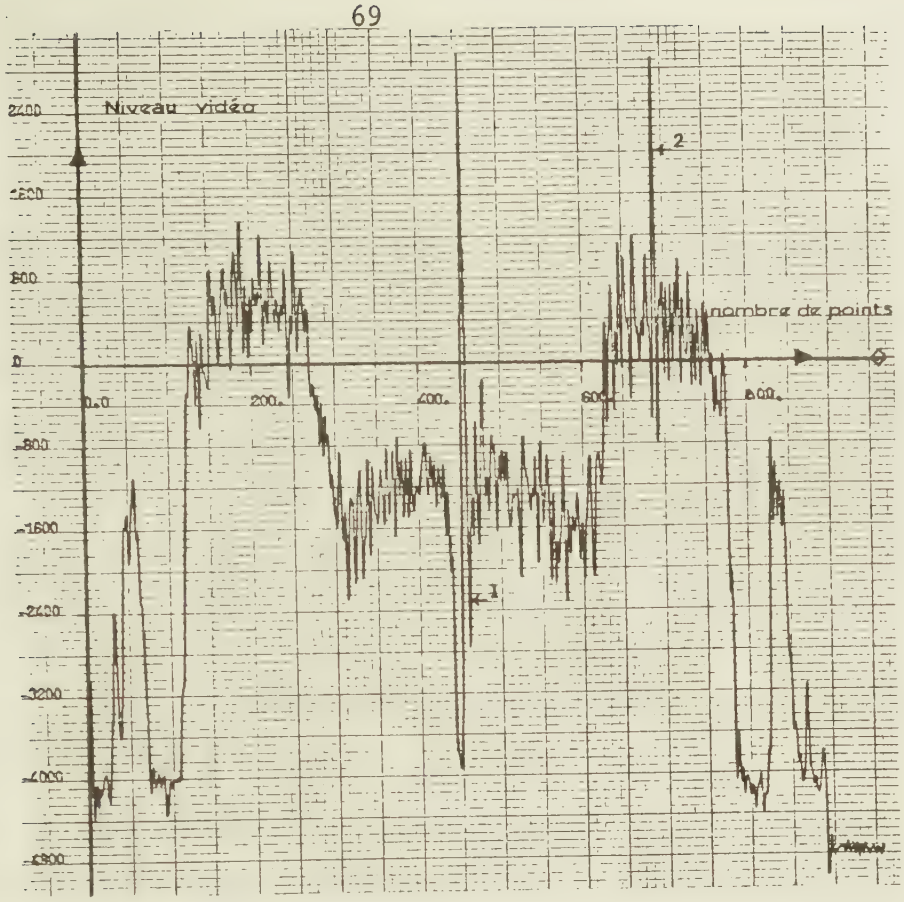


Figure 6-a : Analyse densitométrique perpendiculaire à l'axe des temps de l'image, figure 4, numérisée par le système SANDRA.

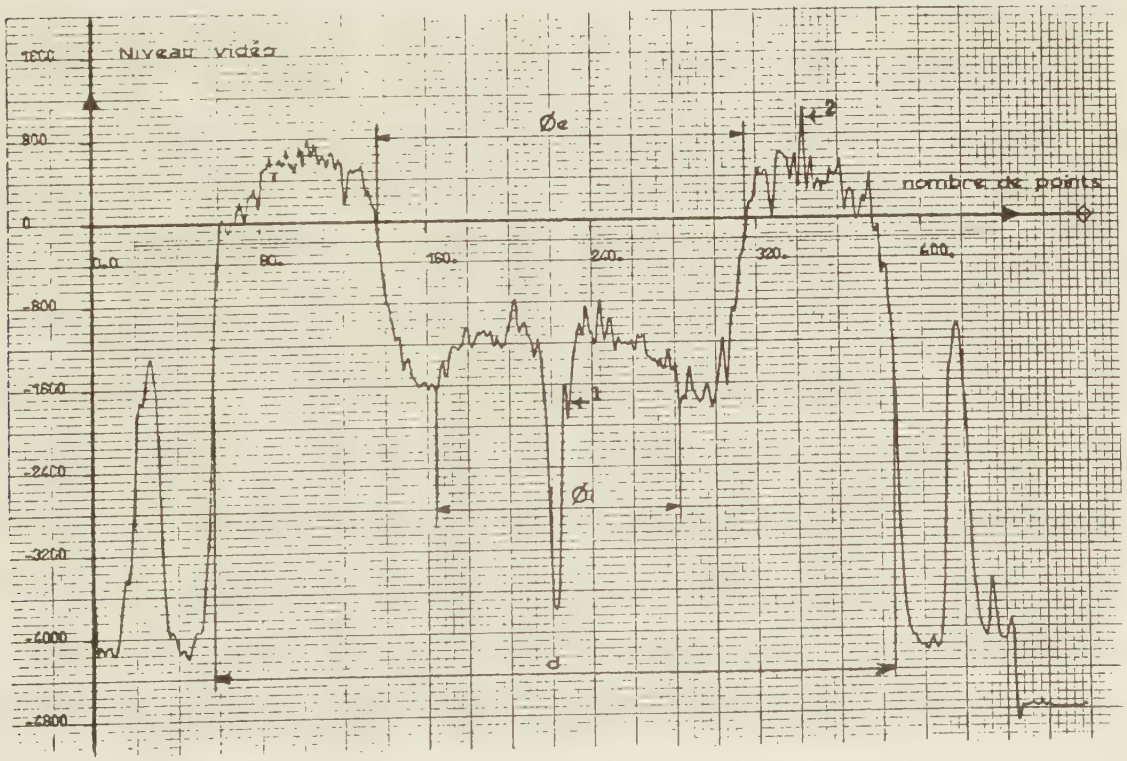


Figure 6-b : Courbe densitométrique perpendiculaire à l'axe des temps de l'image, figure 4, numérisée par le système SANDRA, puis filtrée. Le filtrage a pratiquement fait disparaitre les impulsions 1 et 2.

les mêmes points caractéristiques que l'on détecte d'une manière similaire :détermination de l'isochrone, filtrage digital de la portion d'image entourant l'isochrone, mesure de la distance de référence à mi-hauteur entre le niveau du fond et le niveau maximum des bandes de référence, détection des maxima pour le diamètre intérieur, et des angles de base pour le diamètres extérieur.

I-b Extraction de tracés dont on connait l'orientation .

Le problème général, typique de l'extraction de tracés noirs sur un fond blanc se rapporte aux images de lignes de niveaux. Il s'agit de placer dans un fichier (disque, bande magnétique) l'ensemble des nombres représentant les coordonnées de différentes lignes de niveaux, dans le but de les retracer à l'aide d'une machine à commande numérique.

Notre propos est plus modeste. Les images que nous avons traitées contiennent des tracés dont l'orientation n'est pas quelconque : les tracés sont des segments de droi pouvant avoir deux orientations perpendiculaires; et ces segments, de longueurs varia bles, ont été tracées manuellement sur un fond tramé de pas constant, d'un noeud de trame à un autre uniquement. La longueur des segments est donc toujours un multiple du pas de la trame, à l'imprécision du tracé près. La trame définit en fait un systè de coordonnées dans lequel les coordonnées des extrémités des segments doivent être exprimées pour pouvoir être utilisables par une machine à commande numérique. La tra est imprimée dans une couleur différente sur le support recevant le tracé et dispara lors d'un traitement photographique initial ramenant le document aux dimensions d'un diapositive 24 x 36. Sur cette diapositive qui est maintenant notre image de base, e le négatif réduit du document initial, figure 7, il ne reste que des tracés blancs s fond noir et les informations complémentaires utiles à la numérisation.

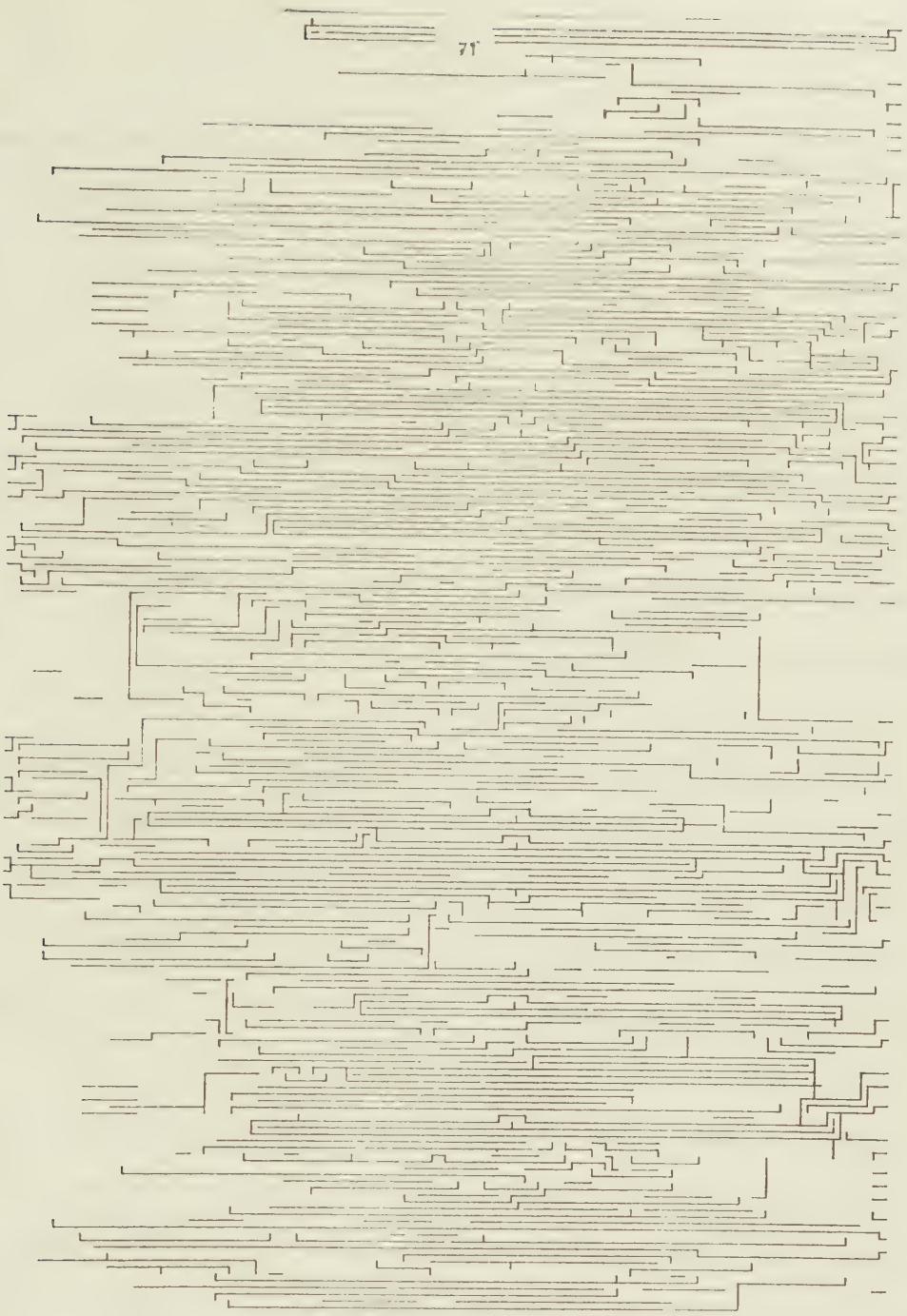


Figure 7 : Exemple d'image de circuit imprimé .

Deux croix de repère imprimées sur le document permettent son positionnement en rotation et en translation sur la platine d'entrée du numériseur. Celui-ci est le lecteur d'images CALIFE 3. Il permet au moyen d'un flying spot d'analyser la transparence locale de 2400 x 3600 points d'un cliché 24 x 36.

L'information à traiter sur le cliché est contenue dans un rectangle calibré de référence dont les dimensions sont respectievement égales à 16 et 20 mm. L'analyse du cliché est limitée au rectangle et son contenu, elle porte sur 1760 x 2170 points et donne 2170 enregistrements de 1760 octets, ce qui laisse une petite marge de 0,8 mm environ tout autour du rectangle.

I-b-α Les paramètres de référence pour le positionnement géométrique .

Ils permettent de reconstruire la trame du support sur laquelle les traits ont été dessinés et qui n'apparait pas sur le cliché négatif. Cette trame fixe le système de coordonnées dans lequel le résultat du traitement doit être donné. Il s'agit de retrouver dans quel système de coordonnées elle a été numérisée à l'aide du système CALIFE afin de pouvoir établir une correspondance avec la trame de numérisation CALIFE. Une cotation exprimée en coordonnées CALIFE doit pouvoir être fournie en coordonnées utilisables par la machine à redessiner les traits tracés à la main.

Le rectangle d'épaisseur calibré imprimé sur le support fait partie intégrante de la trame. Il subsiste sur le cliché négatif réduit, et il matérialise le système de coordonnées de l'image, figure 8.

La fidélité des grandissements selon les deux directions du plan, du dispositif de numérisation n'est pas certaine. La mesure de la distance des côtés parallèles du rectangle fixe les pas réels de numérisation à $2^{o}/00$ près et permet d'établir localement les correspondances entre la trame image et la trame numérique. La mise en phase des deux trames réalise la correction des distorsions spatiales.

La mesure de la pente des côtés du rectangle relativement au balayage CALIFE perm

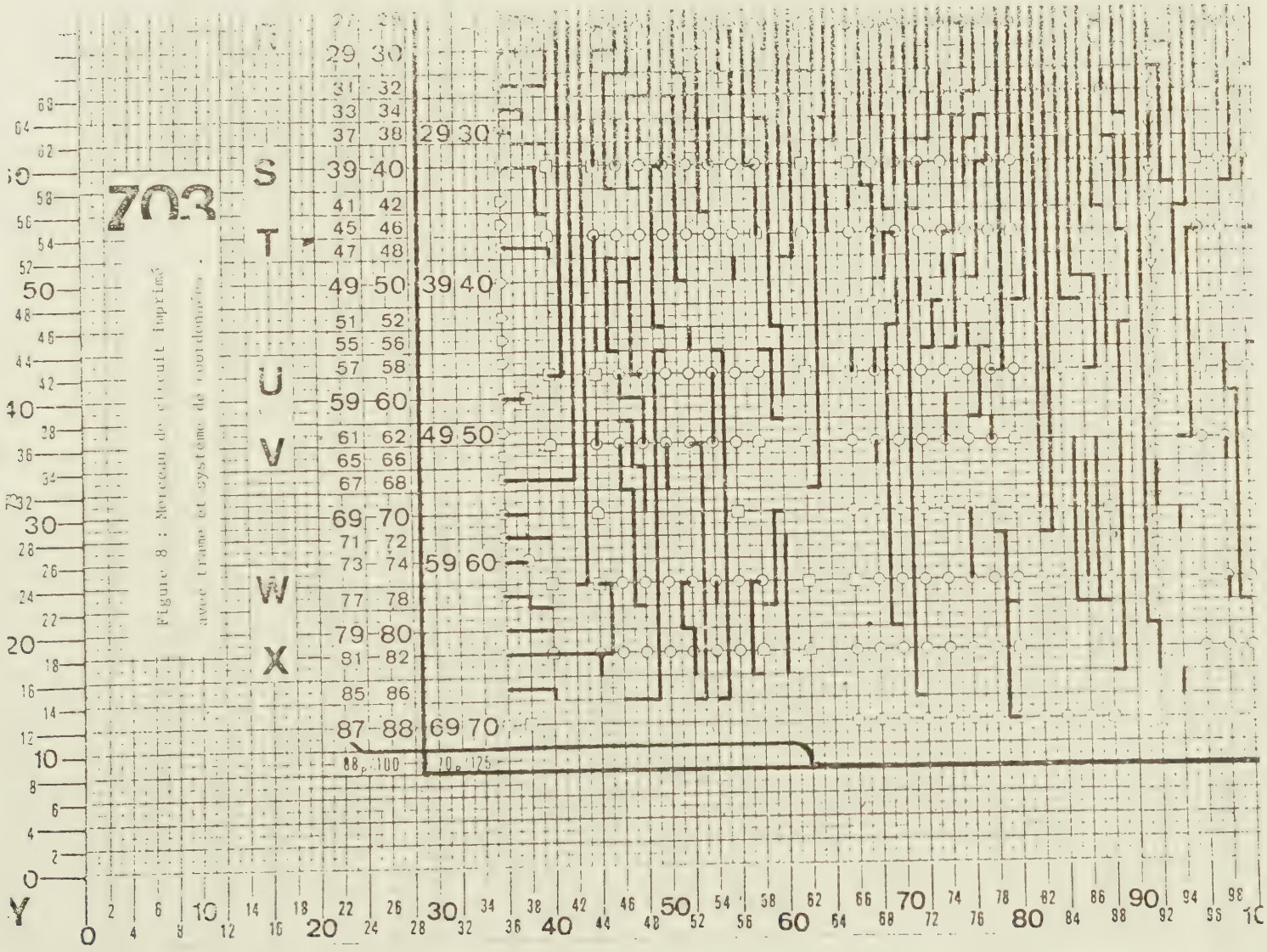


Figure 8 : Morceau de circuit imprimé avec trame et système de coordonnées.

d'autre part de vérifier que le cliché a été correctement positionné en rotation lor de la numérisation. Il convient que cette erreur de positionnement soit très faible, afin d'éviter une correction par ordinateur trop importante (une ligne de la trame image après numérisation ne doit pas occuper trop de place en mémoire centrale, la l de correspondance entre les deux systèmes de coordonnées doit rester la plus simple possible).

Les points des côtés du rectangle s'alignent à $2^{o}/00$ près parallèlement au balaya et $3^{o}/00$ perpendiculairement au balayage (droites des moindres carrés).

On s'est arrangé par ailleurs pour que la tranparence des côtés du rectangle soit représentative des transparences du tracé. La mesure permet alors de fixer le seuil transparence servant à la détection des traits.

Coordonnées CALIFE :

a) niveau de tranparence au point (i,j) : $T_{ij} \in [0 , 255]$

b) abcisse, ou numéro de colonne : $i \in [1 , 1760]$

c) ordonnée, ou numéro de ligne : $j \in [1 , 2170]$

Coordonnées de référence du dessin :

a) abcisse, ou numéro de colonne : $I \in [I_0 , I_0+160]$

b) ordonnée, ou numéro de ligne : $J \in [J_0 , J_0+200]$

c) I_0 et J_0 sont fixés à 8 et 29 respectivement

Les coordonnées (I,J) du plan image, comptées en pas de trame doivent être reliée au coordonnées (i,j) du plan numérique, comptées en pas CALIFE.

Les quatre points du rectangle permettent de fixer approximativement les coordonn (i,j) des différents noeuds de la trame, chapitre deux III-a.

Les éléments du circuit sont détectés entre les noeuds d'une même ligne, ou d'une même colonne, à l'aide d'opérateurs numériques spécialisés. Il y a détection effective des segments lorsque la réponse à un opérateur est supérieure à un seuil préalablement fixé. Ces opérateurs sont d'autant plus efficaces que la correspondance entre les deux familles de coordonnées est plus précise, les zone d'action des opérateurs sont en effet déterminées à partir des coordonnées (i,j) des noeuds de la trame.

I-b-β Les opérateurs de détection .

Les opérateurs numériques utilisent des valeurs échantillonnées de transparence à l'entrée et fournissent une valeur numérique à la sortie.

Lorsque l'image à analyser est composée de traits horizontaux et verticaux, deux opérateurs H et V fonctionnent successivement aux environ d'un noeud de coordonnées (I,J) exprimé en coordonnées (i,j). Comme la distance entre deux noeuds voisins est de 10 pas CALIFE environ, et l'épaisseur des traits est de 3 pas CALIFE environ (à 3 dB); il reste 7 échantillons qui ne sont pas utilisés lorsque deux traits verticaux passent par les noeuds (I,J) et (I+1,J). Dans le cas de l'absence d'un segment horizontal entre les noeuds (I,J) et (I+1,J) la somme des 7 échantillons reste faible, elle est forte s'il y a présence d'un segment. Pour corriger les effets des imprécisions de positionnement des opérateurs par rapport à l'information à traiter, sept sommes sont calculées, et c'est la somme maximum qui est comparée à un seuil.

Le même raisonnement est valable pour la détection des traits verticaux sur le même dessin. Les opérateurs H et V s'écrivent donc :

1) Opérateur segment horizontal H :

$$H(I,J \uparrow I+1,J) = 1 \quad \text{si} \quad \sup_{j=j-3}^{j=j+3} \left\{ \sum_{i+2}^{i+8} T'_{ij} \right\} > s_H$$

où $T'_{ij} = T_{ij}$ si $T_{ij} > \alpha s_H$ et $T'_{ij} = 0$ si $T_{ij} \leq \alpha s_H$

2) Opérateur segment vertical V :

$$V(I,J \uparrow I+1,J) = 1 \quad si \quad \sup_{\substack{i=i-3 \\ j=j+2}}^{\substack{i=i+3 \\ j=j+8}} \{ \sum T''_{ij} \} > s_V$$

où $T''_{ij} = T_{ij}$ si $T_{ij} > \alpha' s_V$ et $T''_{ij} = 0$ si $T_{ij} \leq \alpha' s_V$

Les différents seuils s_H, s_V, sont déterminés expérimentalement lors d'essais d'exploitation. Ils sont fonction de la transparence du rectangle de référence qui est représentative de la transparence moyenne des tracés.

Les coefficients α et α' sont des coefficients de correction de transparence dont le but est d'éliminer le bruit de fond et les effets de bord de la numérisation. Les très faibles niveaux de transparence sont ramenés systématiquement à la valeur zéro. Ils ne viennent ainsi pas s'ajouter dans la zone d'action des opérateurs, rendant le seuils plus efficaces.

Exemple :

Les valeurs approchées des niveaux de transparence affichés par le système CALIFE aux environs du noeud de trame (I = 47 , J = 96) sont donnés figure 9 dans le cas où un segment horizontal et un segment vertical partent de ce noeud.

Dans le cas où les opérateurs H et V sont centrés sur le point (i = 392 , j = 674 nous avons H = V = 700 lorsqu'il y a un segment et H = V = 140 lorsqu'il n'y pas de segment. Il suffit de prendre les seuils $s_H = s_V = 420$ pour être certain du résultat

En fait, le positionnement des opérateurs se fait avec une erreur pouvant aller jusqu'à 2 pas CALIFE et dû à l'imprécision du dessinateur les axes des segments peuv être décalés de 2 pas CALIFE par rapport à la trame de base.

Par ailleurs, ce qui est valable pour un noeud de la trame de référence du circui peut ne pas convenir pour les autres. On détermine alors ces seuils de manière statistique.

j : 671 →	50	60	80	100	80	60	50	40	40	40	40	40	40	40
	60	70	80	100	80	70	60	60	60	60	60	60	60	60
	80	80	90	100	90	80	80	80	80	80	80	80	80	80
j : 674 →	100	100	100	110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
J : 96	80	80	90	100	90	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	60	70	80	100	80	70	60	60	60	60	60	60	60	60
	50	60	80	100	80	60	50	40	40	40	40	40	40	40
	40	60	80	100	80	60	40	30	20	20	20	20	20	20
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	10	10	10	10	10
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	10	5	5	5	5
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	5	3	3	3	3
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	5	2	1	3	2
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	5	1	2	1	1
	40	60	80	100	80	60	40	20	10	5	3	2	1	2

↑ i : 389 ↑ i : 392 , I : 47

Figure 9 : Niveaux de transparence au voisinage d'un noeud de trame numérisé par CALIFE . Les encadrements ont été placés pour indiquer les zones d'action des opérateurs H et V, et les noeuds de trame I,J correspondants.

I-b-γ Evaluation statistique des opérateurs. Recherche des seuils les mieux adaptés

Lorsqu'un tracé comportant des segments de droite a été traité, les opérateurs numériques ont donné lieu à 160 x 200 réponses chacun. Chaque réponse a été comparée à un seuil fixé à l'avance. Le seuil était-il le mieux adapté pour l'ensemble des réponses? Nous disposons à l'issue d'un premier traitement, pour chaque opérateur, de l'ensemble de leurs réponses au voisinage de tous les noeuds de la trame image. L'étude de l'histogramme de ces réponses permet de vérifier que le seuil utilisé était, ou non voisin du meilleur seuil.

Dans le cas des dessins ne comportant que des segments de droite horizontaux et verticaux, l'histogramme des réponses de l'opérateur H présente trois maxima, un maximum pour l'absence de segments, un maximum pour la présence de segments horizontaux dans la zone d'action de l'opérateur H,un maximum parasite pour la présence de segments verticaux dans la zone d'action de l'opérateur H. Le seuil doit être placé entre le maximum parasite et le maximum correspondant à la présence des segments recherchés. Le résultat est d'autant meilleur que les maxima à séparer sont disjoints. L'histogramme des réponses de l'opérateur V présente les mêmes caractéristiques et donne lieu aux mêmes remarques.

Les coefficients α et α' ont un effet sur la forme des histogrammes, et en particulier sur la distance entre les maxima à séparer par un seuil. Leurs valeurs ont été déterminées expérimentalement lors d'essais d'exploitation.

Par ailleurs lorsque les tracés ne sont pas homogènes, la zone de l'histogramme des réponses aux opérateurs situés entre les deux maxima à séparer peut comporter des ondulations, ne permettant pas alors de fixer un seuil avec précision. Nous savons à ce moment que la reconstitution sur machine à redessiner comportera beaucoup d'erreurs.

Les maxima parasites dans les histogrammes des réponses aux opérateurs sont d'autant plus importants que les zones d'action des opérateurs sont imprécises. L'information utilisée provient alors de segments voisins et fausse les réponses. Des défauts phys

ques dans le cliché (poussières, rayures, etc...) ont les mêmes conséquences.

L'ensemble de ces conditions d'analyse et de traitement des clichés explique les erreurs qui s'élèvent à 3% dans un milieu non dépoussièré alors que les documents sont manipulés à la main.

I-c Conclusions .

Nous avons abordé le problème de l'extraction d'une trace ou d'un tracé dans un fond plus ou moins bruité, le tracé ou la trace étant eux-mêmes plus ou moins bruités. Les solutions apportées dans deux cas concrets s'appuient sur les idées suivantes :

1) Le tracé ou la trace ressortent mieux si le fond est moins bruité. On a donc effectué un filtrage digital de l'image en vue d'agir plus sur le bruit de fond que sur le tracé. En effet, le filtre digital agit essentiellement en dehors de la bande de fréquence de l'information utile du signal, voir p. 53.

2) L'analyse directe et locale des informations relatives au tracé. On essaie d'utiliser des opérateurs numériques ne tenant pas compte de l'environnement bruité, c'est-à-dire encadrant au mieux l'information utile et au pire l'information inutile ou parasite. L'analyse statistique des réponses de ces opérateurs permet de fixer le seuil le mieux adapté, à condition qu'il y en ait un, et de montrer leurs limites.

Les résultats apportés sont encourageants. Ils sont comparables aux résultats apportés par les procédés optiques d'amélioration de contraste, mais qu'il faut ensuite traiter numériquement pour obtenir les équations des courbes. L'approche numérique dès le début évite un double travail.

Il faut souligner qu'on ne fait pas ressortir une information perdue (interruption dans le tracé, trace se fondant dans un bruit important). Les solutions généralement présentées relèvent plutôt de l'interpolation ou de l'extrapolation que de l'extraction. Nous sommes alors hors de notre sujet.

II EXTRACTION DES LIGNES DE CONTRASTE

La résolution du problème de l'extraction des lignes de contraste d'une image de teintes est crucial dans le domaine de la reconnaissance des formes. Ces lignes doive permettre de reconnaitre ou d'identifier les objets qu'elles délimitent. L'hypothèse qui est faite ici est que les éléments les plus représentatifs d'un objet sur une image sont justement ses frontières et les lignes de contour qui séparent les différentes surfaces qui le constituent. On admet dans ce cas que les niveaux de gris des surfaces elles-mêmes sont moins représentatifs.

L'hypothèse est justifiée par le fait que l'oeil de l'homme est plus sensible aux variations de contraste d'une image qu'aux luminosités elles-mêmes. Un bon exemple est celui d'une chambre rectangulaire peinte en blanc sur les murs desquels se réfléchit une source lumineuse. L'oeil voit nettement les lignes formées par les angles de murs, alors que ceux-ci ont une luminosité variable. Le contraste est perçu alors que le dégradé de la luminance est négligé. La différence de la luminance est pourtant plus importante entre les deux côtés opposés d'un mur qu'entre les deux côtés adjacen de deux murs contigus. L'oeil ne place pas souvent une ligne au milieu d'un mur!

D'autre part, il est souvent nécessaire de classer les différentes lignes de contraste que l'on peut restituer par ordre d'importance. Certaines surfaces sont nettem séparées alors que d'autres le sont beaucoup moins. La difficulté vient du fait qu'un surface peut être entourée par plusieurs surfaces, et séparée de chacune par des cont tes différents. Dans ce cas, on doit pouvoir réduire l'ensemble de plusieurs lignes d'importance différente à une seule ligne entourant la surface. On a alors un problèm de simplification. Le problème de la simplification des informations extraites d'une image est étudié au chapitre quatre.

Dans certains cas, la délimitation des surfaces est un sous-produit de l'identification de la nature des surfaces elles-mêmes. Deux surfaces contigües peuvent ne pas

être séparées par un contraste (leur teinte moyenne est équivalente), mais plutôt par leur aspect général. D'un côté par exemple, on aura un certain granulé, de l'autre des rayures. Une ligne peut cependant être tracée entre elles. L'analyse de la texture à l'aide de cellules de points permet de dire si l'on est sur une surface ou sur sur l'autre, la ligne sera la frontière entre les cellules contenant du granulé, et les cellules contenant des rayures.

Les méthodes exposées dans ce chapitre relèvent des deux approches évoquées ci-dessus :

1) analyse du gradient,

2) analyse de la composante continue (texture).

Elles ont été complétées par une approche statistique. On a calculé des histogrammes du gradient ou de la composante continue, et on les a interprété pour définir des seuils de séparation entre surfaces.

II-a Utilisation des dérivées de l'image .

Dans ce paragraphe, on admettra que les lignes de contraste d'une image numérique ressemblent localement à des segments de droite. Les endroits où les lignes ont un faible rayon de courbure sont assimilés à des sommets d'angle. Notre propos est d'extraire des lignes de contraste en détectant localement les segments de droite à l'aide des dérivées calculées à partir de l'image numérique à l'aide des fonctions g_{11} et g_{22} de l'ensemble des fonctions g_{nm} étudiées par GUIHO, (3).

La reconnaissance des segments de droite se fait en plusieurs étapes. Nous recherchons dans un premier temps les points susceptibles d'appartenir à un segment de droite, un opérateur affecte à chaque point de la trame un résultat mesurant en quelque sorte l'existence d'un contour en ce point. Puis nous effectuons une sélection parmi tous les points de la trame pour ne retenir que ceux qui sont le plus susceptibles de représenter un contour. Nous appellerons ces points des points de contour. Enfin la

reconnaissance des segments de droite s'effectue aux seuls points de contour à l'ai

d'un nouvel opérateur.

II-a-α Calcul des dérivées de l'image numérique .

1) cas de g_{11} (interpolation linéaire).

Soient x et y les coordonnées réelles de l'image S(x,y) et $p_e = 1$ le pas d'échant

lonnage. On a :

$$S(x,y) = \sum_{r,s \in \mathbb{Z}^2} S(r,s)\, g_{11}(x-r,y-s)$$

Soient p et q les parties entières des coordonnées x et y. On a :

$$\begin{cases} \lambda = x-p \\ \mu = y-q \end{cases} \quad \text{tels que } \lambda, \mu \in [0,1[$$

D'autre part :

$$g_{11}(x-r,y-s) = g_1(x-r).g_1(y-s)$$

d'où : $S(x,y) = \sum_{r,s} S(p+r,q+s)\, g_1(\lambda-r)\, g_1(\mu-s)$

$g_1(\theta) = 0$ si $|\theta| > 1$ donc $g_1(\lambda-r) = 0$ pour $r \neq 0$ et $r \neq 1$

Nous avons, (3) :

$$S(x,y) = S(p,q)(1-\lambda)(1-\mu) + S(p+1,q)\lambda(1-\mu) + S(p,q+1)(1-\lambda)\mu + S(p+1,q+1)\lambda\mu$$

$$S(x,y) = S_0 + S_1\lambda + S_2\mu + S_3\lambda\mu$$

avec $S_0 = S(p,q)$; $S_1 = S(p+1,q) - S(p,q)$; $S_2 = S(p,q+1) - S(p,q)$;

$$S_3 = S(p,q) + S(p+1,q+1) - S(p,q+1) - S(p+1,q)$$

Nous obtenons les dérivées :

$$\frac{\partial S}{\partial x}(x,y) = S_1 + \mu S_3 \quad \text{et} \quad \frac{\partial S}{\partial y}(x,y) = S_2 + \lambda S_3$$

Les filtres linéaires calculés sur $\frac{\partial S}{\partial x}$ et $\frac{\partial S}{\partial y}$ sont respectivement $[-1, +1]$ et $\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$

on peut en calculer d'autres en prenant les valeurs moyennes $(\frac{\partial S}{\partial x})_m$ et $(\frac{\partial S}{\partial y})_m$ de $\frac{\partial S}{\partial x}$ et

sur des domaines limités. Ces filtres ne diffèrent en fait que par leurs directions

selon la notation x ou y.

par exemple pour $(\lambda,\mu) \in [0,1[\times [0,1[$, les filtres seront $\begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix}$ et $\begin{vmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{vmatrix}$

et pour $(\lambda,\mu) \in [-1,1[\times [-1,1[$, ils seront $\begin{bmatrix} -\frac{1}{8} & 0 & \frac{1}{8} \\ -\frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{8} & 0 & \frac{1}{8} \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{8} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{8} \end{bmatrix}$.

2) cas de g_{22} .

Soient p et q les parties entières des coordonnées $(x+\frac{1}{2})$ et $(y+\frac{1}{2})$. On a :

$$\begin{cases} \lambda = x-p \\ \mu = y-q \end{cases} \quad \text{tels que } \lambda,\mu \in [-\tfrac{1}{2}, +\tfrac{1}{2}[$$

et soient $S_{0,0} = S(p,q)$; $S_{0,1} = S(p,q+1)$; $S_{i,j} = S(p+i,q+j)$.

Nous avons $S(x,y) = \sum_{i,j} S_{i,j}\, g_2(\lambda-i)\, g_2(\mu-j)$

et $S(x,y) = S_{0,0}(1-\lambda^2)(1-\mu^2) + \frac{1}{2} S_{1,0}\lambda(\lambda+1)(1-\mu^2) + \frac{1}{2} S_{-1,0}\lambda(\lambda-1)(1-\mu^2)$

$+ \frac{1}{2} S_{0,1}\mu(\mu+1)(1-\lambda^2) + \frac{1}{2} S_{0,-1}\mu(\mu-1)(1-\lambda^2) + \frac{1}{4} S_{-1,1}\lambda\mu(\lambda-1)(\mu+1)$

$+ \frac{1}{4} S_{-1,-1}\lambda\mu(\lambda-1)(\mu-1) + \frac{1}{4} S_{1,-1}\lambda\mu(\lambda+1)(\mu-1) + \frac{1}{4} \lambda\mu(\lambda+1)(\mu+1)$

ou $S(x,y) = S_0 + S_1\lambda + S_2\mu + S_3\lambda\mu + S_4\lambda^2 + S_5\mu^2 + S_6\lambda^2\mu + S_7\lambda\mu^2 + S_8\lambda^2\mu^2$

avec $S_k = \sum_{i,j} \alpha^k_{i,j}\, S_{i,j}$, chaque S_k correspondant à un filtre défini par les $\alpha^k_{i,j}$.

On a ainsi : $S_0 = S_{0,0}$

$$S_1 = \frac{1}{2}\left[S_{1,0} - S_{-1,0}\right] \quad \text{d'où le filtre} \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

de même : $S_2 = \frac{1}{2}\left|S_{0,1} - S_{0,-1}\right|$ et le filtre $\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$

$$S_3 = \frac{1}{4}(S_{1,1} + S_{-1,-1} - S_{1,-1} - S_{-1,1}) \longrightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{4} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \frac{1}{2}(S_{1,0} + S_{-1,0} - 2S_{0,0}) \longrightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_5 = \frac{1}{2}(S_{0,1} + S_{0,-1} - 2S_{0,0}) \longrightarrow \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & -1 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$S_6 = \frac{1}{4}(2S_{0,-1} - 2S_{0,1} + S_{1,1} + S_{-1,1} - S_{1,-1} - S_{-1,-1}) \longrightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$S_7 = \frac{1}{4}(2S_{-1,0} - 2S_{1,0} + S_{1,1} + S_{-1,1} - S_{-1,1} - S_{-1,-1}) \longrightarrow \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{4} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_8 = \frac{1}{4}(4S_{0,0} - 2(S_{1,0} + S_{0,1} + S_{-1,0} + S_{0,-1}) + S_{1,1} + S_{1,-1} + S_{-1,1} + S_{-1,-1}$$

$$\longrightarrow S_8 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

Le calcul des dérivées conduit à :

$$\frac{\partial S}{\partial x}(x,y) = S_1 + \mu S_3 + 2\lambda S_4 + 2\lambda\mu S_6 + \mu^2 S_7 + 2\lambda\mu^2 S_8$$

$$\frac{\partial S}{\partial y}(x,y) = S_2 + \lambda S_3 + 2\mu S_5 + \lambda^2 S_6 + 2\lambda\mu S_7 + 2\mu\lambda^2 S_8$$

et aux filtres :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{pour} \quad \frac{\partial S}{\partial x}(p,q)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{pour} \quad \frac{\partial S}{\partial y}(p,q)$$

En prenant les valeurs moyennes $(\frac{\partial S}{\partial x})_m$ et $(\frac{\partial S}{\partial y})_m$ de $\frac{\partial S}{\partial x}$ et $\frac{\partial S}{\partial y}$ sur des domaines limités, les filtres sont par exemple :

pour $\lambda,\mu \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}[\times [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}[$,

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{48} & 0 & \frac{1}{48} \\ -\frac{22}{48} & 0 & \frac{22}{48} \\ -\frac{1}{48} & 0 & \frac{1}{48} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{48} & \frac{22}{48} & \frac{1}{48} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{48} & -\frac{22}{48} & -\frac{1}{48} \end{bmatrix}$$

Remarque : Les filtres correspondant au laplacien du signal, $S(x,y) = \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}$,

avec la représentation g_{22} , $\Delta S(x,y) = 2(S_4 + S_5 + \lambda S_7 + \mu S_6 + (\lambda^2 + \mu^2)S_8)$

sont pour $\Delta S(p,q)$: $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ et pour $(\Delta S)_m$ sur $\lambda,\mu \in [-\frac{1}{2},\frac{1}{2}[\times [-\frac{1}{2},\frac{1}{2}[$:

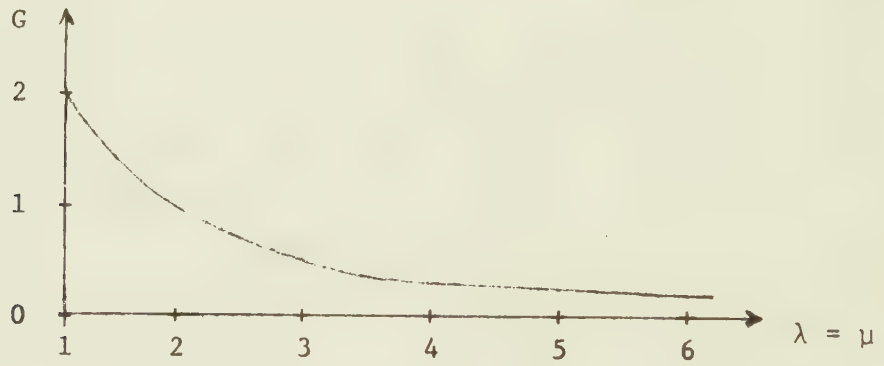
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{12} & \frac{10}{12} & \frac{1}{12} \\ \frac{10}{12} & -\frac{44}{12} & \frac{10}{12} \\ \frac{1}{12} & \frac{10}{12} & \frac{1}{12} \end{bmatrix}$$

A titre indicatif, nous donnons la fonction de gain du filtre passe-haut S_8 que nous avons obtenu p. 84. On a, voir page 54 :

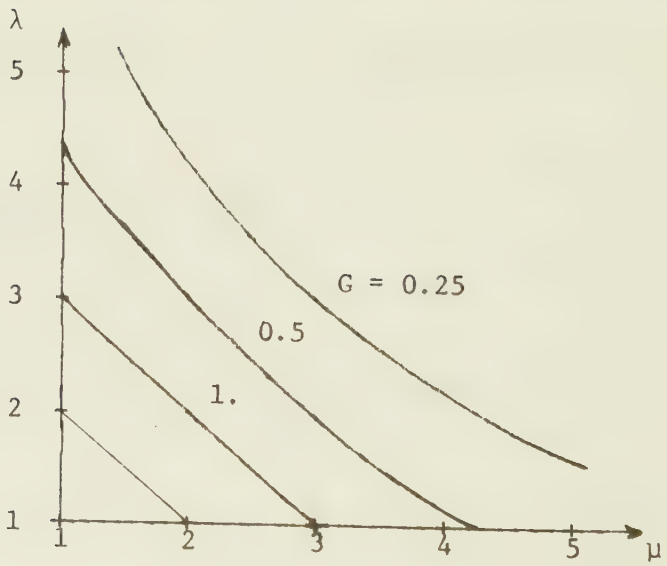
$$G = \left(1 - \cos\frac{\pi}{\lambda}\right).\left(1 - \cos\frac{\pi}{\mu}\right)$$ où λ et μ sont des périodes

$G \to 0$ quand λ , $\mu \to \infty$

Le filtre S_8 a un effet différent du filtre de la page 54. Ce dernier est un filt passe-bas qui conserve la composante continue des images. Le filtre S_8 est plutôt adapté à l'extraction de contours définis par une variation de contraste entre deux zones de transparence à peu près constante .



Graphe de la fonction de gain du filtre S_8 lorsque $\lambda = \mu$.



Lignes de niveaux de la fonction de gain du filtre S_8 .

-a-β Choix d'un opérateur .

Des opérateurs calculés sur le gradient et le laplacien ont été utilisés dans la
ttérature avec un succès plus ou moins grand selon les images, et selon les repré-
ntations. L'inconvénient du gradient est qu'il ne donne pas de résultat indépendant
la direction. Pour y rémédier, nous avons calculé un opérateur à partir de la norme
gradient. L'opérateur choisi en fonction des résultats expérimentaux nous a paru
illeur que celui calculé sur le laplacien.

Considérons les deux normes :

$$||\vec{\text{grad}}\ S(x,y)||_1 = \sqrt{(\frac{\partial S}{\partial x}(x,y))^2 + (\frac{\partial S}{\partial y}(x,y))^2}$$

: $$||\vec{\text{grad}}\ S(x,y)||_2 = |\frac{\partial S}{\partial x}(x,y)| + |\frac{\partial S}{\partial y}(x,y)|$$

ur chaque couple de filtres correspondant à $\frac{\partial S}{\partial x}$ et $\frac{\partial S}{\partial y}$ calculés de façon analogue, nous
ux types d'opérateurs selon la norme choisie.

Nous avons pris l'opérateur G_1 tel que :

$$(p,q) \xrightarrow{G_1} g(p,q) = |S(p+1,q) - S(p-1,q)| + |S(p,q+1) - S(p,q-1)|$$

-a-γ Sélection des points de contours .

Les filtres linéaires, testés à chaque point de l'image numérique, donnent des
ponses croissant avec la probabilité d'appartenance de ce point à un contour.

finition : Un point appartient à un contour si $||\vec{\text{grad}}\ S(x,y)||$ passe par un maximum
ce point lorsqu'on se déplace dans la direction de $\vec{\text{grad}}\ S(x,y)$.

Cette définition étant difficile à manipuler d'une manière pratique, nous lui
ons substitué la définition suivante, utilisée comme critère de sélection des points
contour.

Définition : Un point (p,q) de l'image numérique est choisi comme point de contour s
g(p,q) est maximum soit sur une ligne, soit sur une colonne, et si g(p,q) est supéri
à un seuil de contour ε_c .

On a ainsi : $g(p,q) \geq g(p,q+1)$ $\qquad$ $g(p,q) \geq g(p+1,q)$

ou

$g(p,q) \geq g(p,q-1)$ $\qquad$ $g(p,q) \geq g(p-1,q)$

et $g(p,q) > \varepsilon_c$.

Comme g(p,q) est une quantité positive ou nulle et qu'un point de contour est tel que $g(p,q) = \varepsilon_c$, nous pouvons lui associer la quantité $\bar{g}(p,q)$ telle que :

1) $\bar{g}(p,q) = -\alpha g(p,q)$ si (p,q) est un point de contour et α un coefficient d'ac tuation de contraste,

2) $\bar{g}(p,q) = g(p,q)$ si (p,q) n'est pas un point de contour .

Le coefficient α a été déterminé expérimentalement .

II-a-δ Reconnaissance des éléments droits .

En chaque point de contour sont appliqués huit filtres linéaires sur les valeurs g(p,q) dont les réponses $r = (r_1, r_2, \ldots, r_8)$ nous permettent de décider s'il y a dé de segment de droite.

Soient a_{ij}^k les coefficients du filtre k , nous avons :

$$r_k(p,q) = \sum_{i,j} a_{ij}^k \, g(p+i,q+j)$$

Les filtres ont été choisis de telle sorte que $i \in [-4 , +4]$ et $j \in [0 , +4]$ et correspondant à huit directions dans un demi-plan.

Nous avons reconnu un segment de droite dans la direction k si :

1) $r_k = \sup_i \{r_i\}$

2) $r_k > \varepsilon_a$ seuil absolu relatif

3) $\dfrac{r_k}{\sum_i r_i} > \varepsilon_r$ seuil relatif tel que $\varepsilon_r > \varepsilon^* = \inf \{ \varepsilon : \varepsilon = \dfrac{\sup_i \{r_i\}}{\sum_i r_i} , \; r_i \in \mathbb{R}^+ \; \forall i$

orsque nous avons reconnu l'existence d'unsegment dans la direction k, nous recher-
s à l'intérieur d'un petit carré (3 x 3) dans la direction indiquée un point (p,q)
que :

e point soit un point de contour : $\bar{g}(p,q) < 0$

e point soit maximum dans ce carré : $g(p,q) \geq g(p',q')$

'il existe un tel point, celui-ci est considéré comme nouveau point de départ pour
echerche d'un segment de droite. Les contours obtenus sont ainsi des succesions de
ents de droite qu'il convient maintenant de traiter pour reconnaitre des formes.
e question sera abordée au chapitre quatre.

-ε Conclusions .

'analyse de la photographie aérienne de la figure 10, numérisée par le système
FE, à l'aide de la méthode présentée ci-dessus a abouti au tracé de la figure 11,
pparait l'ensemble des segments reconnus. Les différents paramètres ont été fixés
rès l'allure des tracés. Le meilleur tracé obtenu est insuffisant si on veut le
ire au tracé des quelques rectangles de la photographie, mais il est déjà suffisant
'on s'intéresse seulement à la détection de lignes droites perpendiculaires.

Figure 10 : Image de photographie aérienne .

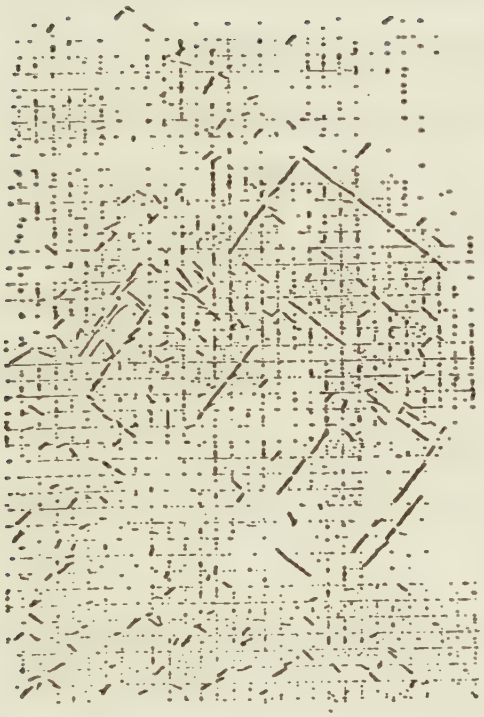


Figure 11 : Image de traits extraite de l'image de teintes, figure 10, à l'aide de la méthode, p.88 .

II-b Utilisation des histogrammes de l'image .

Définition : Par histogramme d'une photographie, ou d'une zone de photographie, il f
entendre l'application qui, à toute valeur prise par une ou plusieurs grandeurs affe
tées à chaque point de la photographie, associe le nombre de points pour lesquels la
ou les grandeurs en question prennent cette valeur.

La grandeur de base est le niveau de transparence associé à un point de la photog
phie. On lui a fait correspondre l'histogramme des transparences de l'ensemble de la
photographie, ou de zones de celles-ci. Des zones de transparence sensiblement const
te, c'est-à-dire dont les histogrammes des niveaux de transparence sont à peu près
gaussiens, peuvent être séparés à l'aide d'un seuil au moyen de considérations probab
listes. Les zones définissent des contours qui peuvent être décomposés en segments
droite. Notre propos est d'extraire effectivement ces contours en reconstituant les
zones de transparence constante.

D'autres valeurs peuvent être associées aux points de la photographie, auxquelles
peut faire correspondre des histogrammes. En particulier, on peut utiliser les diffé
ces de niveaux entre points consécutifs (voir p. 82 le calcul des dérivées de l'imag
à l'aide de la fonction d'interpolation linéaire g_{11}), comme approximation du gradie
L'extraction de contours à l'aide des histogrammes du gradient a donné des résultats
satisfaisants. On peut aussi utiliser des histogrammes pour lesquels un couple de pa
mètres prend une certaine valeur, par exemple les couples "niveau d'un point- différ
ce de niveau du point consécutif" et "distance entre deux points-différence de nivea
de ces deux points". Ces histogrammes permettent d'évaluer la texture de zones de la
photographie. On pourrait aussi fabriquer des histogrammes pour lesquels n paramètre
prendraient une certaine valeur. Ce travail n'a pas été effectué.

II-b-α Recherche d'un seuil de séparation .

L'opérateur choisi est un seuil de séparation. Pour chaque point il y a deux répo
ses possibles (le niveau est supérieur ou inférieur au seuil) qui seront interprétées

comme l'appartenance à une zone ou à l'autre.

Nous allons partir des histogrammes de deux zones distinctes de la photographie et hercher l'information, (11), apportée par un seuil de séparation. Soient deux réponses la question posée, que nous noterons a_1 et a_2. Les deux formes w_1 et w_2 correspondant l'opérateur idéal sont la zone à laquelle appartient le point.

Soit N_1 le nombre de points de la forme w_1 se trouvant au dessus du seuil, soit N_2 elui de w_2. Soit H_1 le nombre total de points de la forme w_1 et soit H_2 celui de w_2.

Nous avons alors les probabilités suivantes :

$$p(a_1) = \frac{N_1 + N_2}{H_1 + H_2} \qquad p(a_2) = \frac{H_1 + H_2 - N_1 - N_2}{H_1 + H_2}$$

$$p(\omega_1|a_1) = \frac{N_1}{H_1 + H_2} \qquad p(\omega_1|a_2) = \frac{H_1 - N_1}{H_1 + H_2 - N_1 - N_2}$$

$$p(\omega_2|a_1) = \frac{N_2}{H_1 + H_2} \qquad p(\omega_2|a_2) = \frac{H_2 - N_2}{H_1 + H_2 - N_1 - N_2}$$

L'information apportée est :

$$I = H(\Omega) - \sum_j p(\Omega|a_j(k))p(a_j(k)) \quad , \quad \text{où } H(\Omega) \text{ est l'entropie ;}$$

r ici :

$$H(\Omega|a_j(k)) = -p(\omega_1|a_j)\mathrm{Log}_2\, p(\omega_1|a_j) - p(\omega_2|a_j)\mathrm{Log}_2\, p(\omega_2|a_j)$$

t :

$$H(\Omega) = -\sum_i p(\omega_i)\, \mathrm{Log}_2\, p(\omega_i) \ .$$

Si les probabilités des zones sont égales, on a :

$p(\omega_i) = \frac{1}{2}$, soit : $H(\Omega) = 1$, ce qui permet de calculer I.

Le programme réalisé exécute ce calcul pour deux zones choisies, et pour toutes les aleurs possibles du seuil de séparation. Il permet ainsi d'optimiser le seuil de séparation de deux zones. Les résultats, sur différentes zones de la photographie, notamment es toits et de la forêt, fig. 12, sont assez bons. Nous avons alors essayé non plus e rechercher des opérateurs correspondant à des zones déterminées à l'avance, mais 'utiliser cette méthode pour rechercher des zones caractéristiques. Le principe en st le suivant : à partir d'une petite partie de la photographie, on étudie l'informa-

tion apportée par une séparation au seuil optimal entre cette partie et le reste de photographie. Les variations de cette information lorsqu'on agrandit petit à petit l zone étudiée vont nous permettre de l'optimiser et de déterminer ainsi une zone qui "se sépare bien" du reste de la photographie.

Un programme a donné des résultats satisfaisants en construisant une zone à parti du bord de la photographie. Comme une étude point par point serait trop longue, nous avons pris comme éléments constitutifs de zone des carrés de 5 x 5 points. On part d la première ligne à gauche, on ajoute à la zone étudiée un carré en suivant cette li Si l'information augmente ou diminue peu, on incorpore ce carré à la zone déjà formé Sinon on passe à la ligne suivante.

Algorithme :

Pas 1 : lecture du 1^{er} carré 5 x 5, IC,JL = 1 ;

Pas 2 : calcul de I ;

Pas 3 : lecture d'un carré 5 x 5 , IC = IC + 1 ;

Pas 4 : calcul de ΔI ;

Pas 5 : si $\Delta I > 0$, carré(IC,JL) = 1 , aller à Pas 3 ; sinon carré(IC,JL) = 0 , I

Pas 6 : lecture d'un carré 5 x 5 , JL = JL + 1 ;

Pas 7 : calcul de ΔI ;

Pas 8 : si $\Delta I > 0$, carré(IC,JL) = 1 , aller à Pas 3 ; sinon carré(IC,JL) = 0 , f

L'avantage de cette méthode est que le seuil diminue lorsque localement les niveaux diminuent. Dans le même cas, la méthode qui consiste à placer un seuil constant sur semble de l'image est défaillante.

Comme la dimension de la zone étudiée augmente au fur et à mesure de l'avancement u programme, les variations d'information ne sont pas du même ordre au début et à la in du calcul. Au voisinage des frontières, le calcul du seuil doit être plus soigné. n a remédié à ceci en faisant à la fin du calcul une nouvelle étude sur les frontières. a difficulté vient d'une part du fait que le contour de la zone a une allure compli- uée, d'autre part que les carrés 5 x 5 sur la frontière contiennent plus ou moins e points de la zone que l'on veut isoler. Le calcul de la variation d'information ap- ortée par un carré relativement à l'ensemble de la zone permet de décider si un carré été abusivement rejeté ou intégré à la zone lors de la première analyse. Par ailleurs ette méthode complémentaire est avantageuse dans tous les cas où les zones intéressan- es sont pointées à l'aide d'un système interactif. L'étude aux frontières est alors aite automatiquement en parallèle, et l'utilisateur n'a pas besoin de faire un suivi récis, c'est-à-dire lent et fatiguant. Ce programme a permis d'isoler de manière très orrecte, figure 13, une zone de forêt sur la photographie.

Notre propos est maintenant de rechercher un seuil de séparation plus stable des zo- es de transparence constante. Pour cela, nous allons nous servir du gradient, ou plu- ôt d'approximations de ce gradient selon les deux directions orthogonales de l'image umérique. L'histogramme des gradients est constitué de la manière suivante :

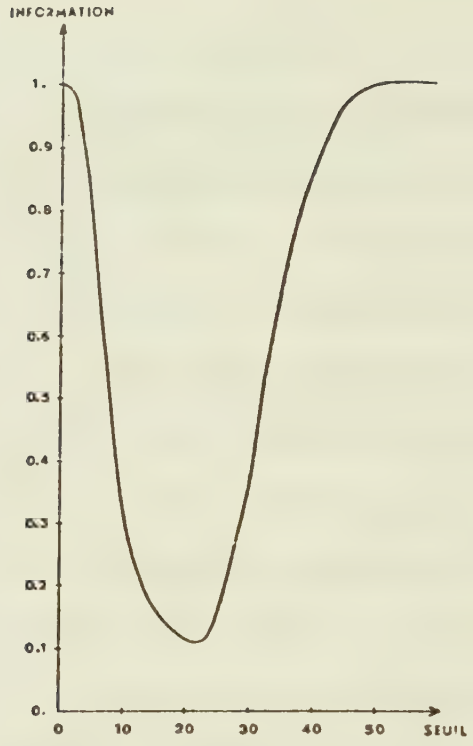


Figure 12 : Le niveau de transparence optimal pour la séparation de deux zones de la photographie aérienne, figure est donné par le minimum de la courbe.

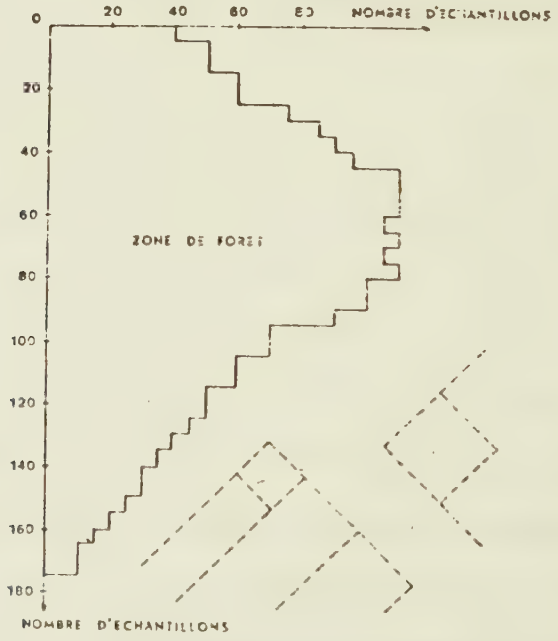


Figure 13 : Extraction d'une zone de forêt sur la photographie aérienne, figure 10.

otations :

Soit $T_{i,k}$ la transparence au point P(i,k) , le gradient moyen horizontal au point i,k) s'écrit :

$$G_H(i,k) = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^{n} (T_{i-j,k} - T_{i+k,k}) \right)$$

e gradient moyen vertical au point (i,k) s'écrit :

$$G_V(i,k) = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^{n} (T_{i,k-j} - T_{i,k+j}) \right)$$

a transparence moyenne horizontale au point (i,k) s'écrit :

$$T_{MH}(i,k) = \frac{1}{2n} \left(\sum_{j=1}^{n} (T_{i-j,k} - T_{i+j,k}) \right)$$

a transparence moyenne verticale au point (i,k) s'écrit :

$$T_{MV}(i,k) = \frac{1}{2n} \left(\sum_{j=1}^{n} (T_{i,k-j} - T_{i,k+j}) \right)$$

On appelle E_j l'ensemble des points $P(a_n,b_n)$ tel que $T_{MH}(a_n,b_n) = T_j$

et E'_j l'ensemble des points $P(c_n,d_n)$ tel que $T_{MV}(c_n,d_n) = T_j$

Les cardinaux respectifs de E_j et E'_j seront notés J_j et J'_j.

On calcule :

$$L_j = \sum_{a_n} \sum_{b_n} (G_H(a_n,b_n))^2 \quad \text{et} \quad L'_j = \sum_{c_n} \sum_{d_n} (G_V(c_n,d_n))^2$$

t la fonction F(T) telle que :

$$F(T) = \frac{L + L'}{(J + J')^{1/2}}$$

On calcule ensuite la valeur moyenne V_m de F(T) sur les intervalles où elle n'est as nulle, et on pose $V_m^* = p.V_m$ où p est un paramètre dont la valeur sera fixée par des onsidérations expérimentales.

Le seuil de séparation S est déterminé de la manière suivante :

oit T_0 l'abcisse du maximum M_0 de la fonction F(T),

On a : $S = T_0$ si et seulement si $M_0 > V^*_m$,

sinon, on dit qu'il n'y a pas de seuil S utilisable.

L'image est alors divisée en deux classes de points, le cas échéant, ceux dont la transparence est supérieure au seuil, et ceux dont la transparence est inférieure à c même seuil. Les points de contours sont définis comme les plus proches voisins des po d'une des classes.

II-b-β Décomposition de l'histogramme des transparences de l'image .

La méthode utilisée, qui s'appuie sur les résultats de l'étalonnage en densité du capteur optique CALIFE 2, est une méthode itérative qui définit un certain nombre de niveaux de transparence principaux à partir de l'histogramme de la photographie numérisée, puis ramène les valeurs numériques de la transparence à ces niveaux principaux

A l'aide de 12 clichés de référence de densité connue et constante, nous avons engendré après numérisation, l'histogramme des réponses N(d) dont l'allure est gaussienne. Nous cherchons en fait à représenter l'histogramme des niveaux de transparence de l'image par une somme de gaussiennes, chaque gaussienne étant la représentation d'un niveau principal de transparence. On admet en fait dans notre méthode, que l'image est composée de zones sensiblement constantes. L'histogramme de chaque zone a l'allure d'une gaussienne. Le problème que nous voulons résoudre est celui d'extraire de l'histogramme global, les différentes gaussiennes qui l'ont composée. Nous nous sommes servis pour cela de clichés de référence dont l'histogramme des transparences est une caractéristique importante. Nous avons alors cherché une loi linéaire pour l'écart-type en fonction de ces réponses N(d), et nous avons trouvé :

$\sigma = aN + b$ avec $a = 0,1$; $b = 1,3$ tel que : $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \neq 5\%$.

Soit n le nombre de points dont le niveau de transparence est N, et soit M le niveau pour lequel on a n = n maximum. Grace à la loi $\sigma = aN + b$, on associe à M la valeur et l'on construit sur M la gaussienne correspondante. On soustrait celle-ci de l'histogramme, et on réitère la méthode sur l'histogramme résiduel jusqu'à ce que la somme des points des gaussiennes soustraites soit voisine du nombre de points de l'histogramme initial, figure 14. Chacune des gaussiennes soustraites définit un niveau de transparence principal n_0.

Le problème est maintenant d'affecter à chaque point (p,q) de la photographie numérisée la valeur d'un de ces niveaux principaux.

A chaque niveau principal, nous faisons correspondre un segment centré sur ce ni-

eau, de largeur 2σ et nous supposons alors que tout point de ce segment appartient à e niveau principal.

Ces n segments forment un recouvrement sur l'ensemble des niveaux, mais non une artition.

Si le niveau d'un point n'est recouvert que par un seul segment s_i il prend la valeur i du niveau principal correspondant; si le niveau d'un point est recouvert par plusieurs egments, le niveau principal correspondant est choisi de la manière suivante, fig. 15 : e niveau principal affecté au point P est le même que le niveau principal affectable u plus grand nombre des huit points notés "+" entourant le point P dont les niveaux uraient été ramenés à la somme pondérée des neuf niveaux des points des carrés C_i.

L'image numérique obtenue à la sortie du capteur optique CALIFE est maintenant emplacée par une image numérique composée de niveaux principaux. Elle peut tre traitée selon la méthode exposée au paragraphe I . Le résultat apparait à la figue 16.

I-b-γ Histogrammes de couples de paramètres associés à l'image .

Avant d'exposer nos méthodes, nous devons citer le travail fait par A. ROSENFELD, 22). Le couple de paramètres qu'il utilise est le suivant :

soit $\delta = (\Delta X, \Delta Y)$ un vecteur,

osenfeld calcule $M_\delta(i,j)$ nombre de fois qu'un point de niveau de gris T = j se trouve une distance δ d'un point de niveau de gris T = i .

Lorsque la zone étudiée est constituée de traces à peu près parallèles, $M_\delta(i,j)$ épend de la direction de δ, et l'analyse de sa variation permet de mesurer la direction globale de la zone. Lorsque la zone est constituée de gros grains, $M_\delta(i,j)$ est aible quand δ est faible et i très différent de j. Si les grains sont fins, alors $_\delta(i,j)$ est relativement plus grand, parce que les niveaux i et j ne se trouvent pas ouvent sur le même grain. La mesure de $M_\delta(i,j)$ est ainsi utilisable pour évaluer le

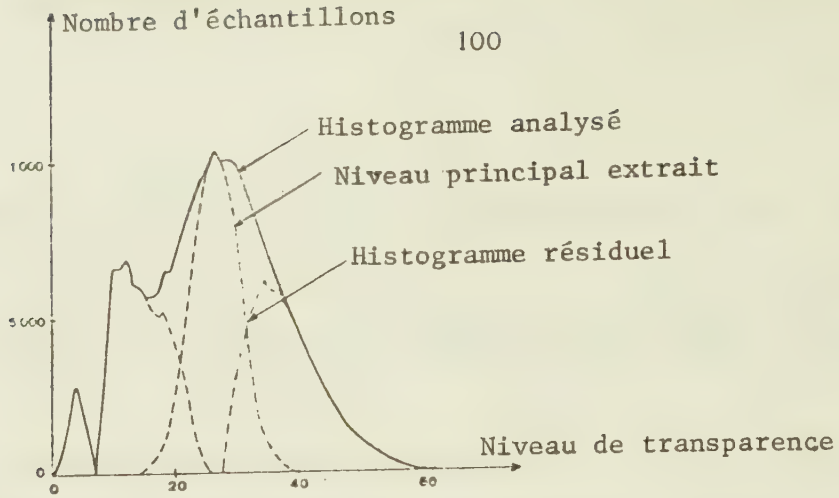


Figure 14 : Recherche des niveaux principaux de la photographie, figure 10 .

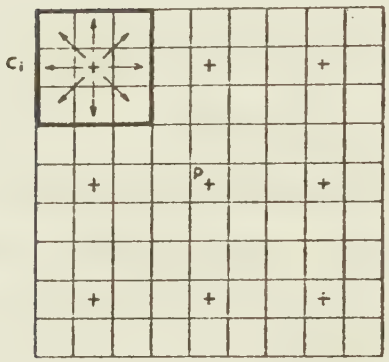


Figure 15 : Grille de recherche pour le choix local d'un niveau principal au point P .

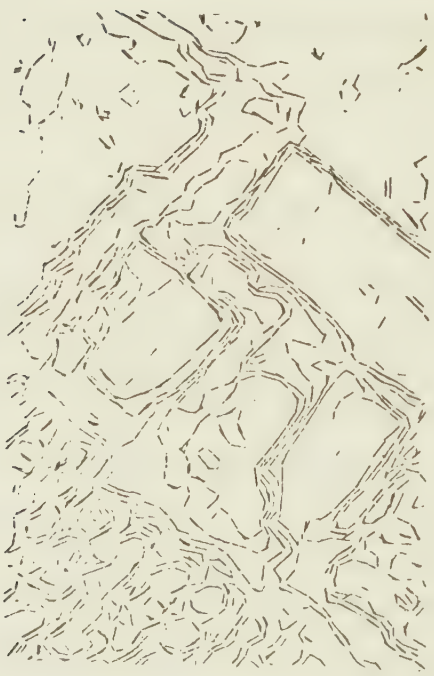


Figure 16 : Image de traits extraite de l'image de niveaux principaux à l'aide de la méthode, p.88.

ranulé d'une zone de photographie.

Rosenfeld propose aussi de calculer $D_\delta(k)$ nombre de couples de points distants de dont la différence est égale à k, et obtient des résultats similaires.

Les couples de paramètres que nous avons utilisés sont le niveau associé à la différence de niveau, et surtout la distance entre deux optima consécutifs associée à la ifférence de niveau entre ces optima.

) Couple "niveau d'un point-différence de niveau du point consécutif".

L'histogramme du couple est constitué en considérant chaque point (p,q) de l'image umérique comme muni de deux coordonnées : son niveau de transparence, et la différence de niveau avec le point voisin (p, q+1). L'analyse de cet histogramme, après élimination des points parasites dûs au bruit, n'apporte pas beaucoup de renseignements sur a nature des zones étudiées. On constate d'autre part que lorsqu'un niveau est proche 'un maximum, les différences sont positives, et qu'au contraire, lorsqu'un niveau est roche d'un minimum, les différences sont négatives.

) Couple "écart-distance d'extréma".

La distance d'extréma est représentée par le nombre de points entre deux extréma uccessifs d'une ligne de l'image numérique. L'écart représente la différence de niveau ntre ces deux extréma successifs.

On peut, sur la photographie aérienne, figure 10, distinguer assez nettement cinq ones, par ordre d'intensité lumineuse croissante :

- la cour entre les bâtiments, en partie dans l'ombre,
- la forêt,
- l'arbre surplombant le bâtiment,
- le verger,
- les toits.

Notre but est d'extraire les toits du reste de la photographie aérienne.

L'histogramme du couple "écart - distance d'extrema" a été engendré pour chaque zone, l'écart en ordonnée et la distance en abscisse. Les points de l'histogramme se groupent dans un rectangle dont deux côtés sont les axes de coordonnées, les deux autres étant les tangentes à la tache formée par les points. Si on appelle $\mathcal{E}$ et $\mathcal{D}$ les dimensions respectivement verticale (écart maximum) et horizontale (distance minimal le rapport $R = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{D}}$ sera d'autant plus élevé que le signal sera plus monotone. R sera p contre élevé pour des signaux très bruités.

Il est apparu que ce rapport R permettait de différencier assez nettement l'ensem des toits (pour lesquels R est inférieur à 1,5 ou 2) du reste de la photographie (où R est le plus souvent supérieur à 2, parfois à 3).

Ce résultat acquis, nous avons effectué l'histogramme des écarts et distances ext ma pour la photographie complète, en affectant à chaque extrémum les deux nombres D E (distance à l'extremum précédent, sauf pour le premier de la ligne , écart de nive (en valeur absolue) avec l'extremum précédent). Puis la photographie a été fragmenté en 144 bandes de 96 carreaux de 5 x 5 points. Tout extrémum est ainsi situé dans un un seul carreau.Chaque carreau est représenté par un point en restitution.

Pour chaque carreau, on a cherché les valeurs maximales de D et E, soient D_{max} et E_{max}, puis on a effectué le rapport $R' = E_{max}/D_{max}$.

Un seuil R'_0 étant donné, en chaque point ou carreau où R' est inférieur à R'_0 , on édite un blanc, sinon, on édite un caractère "*", sur une imprimante à trame carrée par exemple. Pour une valeur convenable de R'_0 on doit voir les toits se détacher en blanc sur le fond d'étoiles représentant le reste de la photographie. La meilleure valeur se situe autour de 2,3 .

I-b-δ Conclusions .

Différentes méthodes d'extraction de contours à l'aide d'histogrammes ont été expo-
ées. On a utilisé l'histogramme de la transparence des points de l'image, un histogram-
e calculé sur les différences de niveaux autour de chaque point de l'image, des histo-
rammes de différences de niveaux associés à des distances entre points de niveaux don-
és ou non. On a d'abord cherché dans chaque cas un critère pour obtenir un bon seuil
e séparation entre zones de niveaux différents. Ce seuil s'obtient d'autant mieux
ue l'on constitue les histogrammes sur des zones réduites, dans le cas des histogram-
es du gradient, les zones étant alors constituées de un ou deux niveaux. Les histogram-
es de la transparence sont plus simples à manipuler dans le cas où les zones étudiées
ont plus grandes, et constituées de plus de deux niveaux. On augmente le pouvoir
'extraction en utilisant des histogrammes de transparence étalons liés au capteur uti-
isé pour l'analyse des images. Les histogrammes utilisant deux paramètres sont plus
daptés pour reconstituer des zones où les niveaux sont plus définis par des variations
ocales de niveaux (texture) que par leur moyenne. Chaque type d'image devient alors un
as différent, avec un paramètre prépondérant qu'il faut découvrir et utiliser pour
xtraire des limites de zones.

BIBIOGRAPHIE DU CHAPITRE TROIS

(1) CHECROUN A. "Reconnaissance des formes par un ordinateur", Thèse d'Etat, Par 1972 .

(2) DUNNE J. A. "Mariner 1969 Television image processing", Pattern Recognition, volume 2, decembre 1970, pp. 261 à 268 .

(3) GUIHO G., SIMON J. C. "Picture representation and transformation by computer" Pattern Recognition, volume 3, 1971, pp. 169 à 178 .

(4) HOLDERMANN F., KAZMIERCZAK H. "Generation of line drawing from grey scale pic tures", Research group at the institute for information processing an transmission, University of Karlsruhe, Germany, 1971.

(5) JANUTSH D. A., AFANASIEV N. F. "Résultats fondamentaux des études microphoto- métriques des images de photographie aérienne des objets naturels", traduction IFP, référence 18110, revue par M. GUY, décembre 1970 .

(6) KAHN E. "Un système d'analyse optique : le CALIFE , première partie : l' talonnage", Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, volume 3, 1972.

(7) LENT J. D. "The feasibility of identifying wildland resources through the a nalysis of digitally recorded remote sensing data", a report of resea performed under the auspices of the forestry remote sensing laborator Berkeley, California, 30 septembre 1968.

(8) NATHAN R. "Picture enhancement for the moon, mars, and man", Picturial Pat Recognition, Thomson book compagny, 1968.

(9) NOURISSAT Y. "L'analyseur d'images CALIFE", L'Onde Electrique, septembre 1969 volume 49, pp. 869 à 873.

(10) PEPLIES R. W., WILSON J. D. "Analysis of a space photo of a humid and foreste region : a case study of the Tennessee Valley", Department of Geograp East Tennessee State University, Johnson City, Tennessee, octobre 197

11) ROCHE C. "Idées générales en reconnaissance des formes appliquées à la parole", Automatisme, mars 1972, volume 17, n°3 .

12) SIMON J. C., CHECROUN A. "Procédés de filtrage numérique d'une image de lignes", Automatisme, mars 1972, volume 17, pp. 92 à 102 .

13) UGLEV J. V. "Système d'identification probabiliste des objets locaux d'après les signaux d'exploitation micr-photométrique des photographies aériennes", traduction IFP, référence 18809, revue par M. GUY, décembre 1970.

14) KAHN E. "Un système d'analyse optique : le CALIFE , deuxième partie : Reconnaissance des formes sur photographies aériennes", Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, 1972, tome 3, n°5, pp. 273 à 279.

15) KAHN E. "Méthodes de prétraitement et de filtrage des images, applications diverses avec exemples à l'appui", Actes des journées d'études sur le traitement des images du C.N.E.S., 13-15 déc.1972, pp. 41 à 49.

16) KAHN E., NOURISSAT Y., VIGUIER P. "Acquisition et traitement de cinéradiographies ultrarapides", Proceedings 10th Int. Cong. High Speed Phot., 1972.

17) O'HANDLEY D., GREEN W. "Recent developments in digital image processing at the image processing laboratory at the JPL", Proceedings of the IEEE, vol. 60, n°7, July 1972, pp. 821 à 828.

18) SCHROEDER M. "Images from computers", IEEE Spectrum, March 1969, pp. 66 à 78 .

19) KAHN E. "Traitement automatique de photagraphies de circuits imprimés dessinés à la main", L'Onde Electrique,

20) ROSENFELD A. "A note on automatic detection of texture gradients", IEEE Transactions on computers, octobre 1975, pp. 988 à 991 .

21) DAVIS L., ROSENFELD A. "Detection of step edges in noisy one-dimensional data", IEEE Transactions on computers, oct. 1975, pp. 1006 à 1010 ; Technical report 303, May 1974, Univ. Maryland, College Park, Maryland.

(22) ROSENFELD A., WESZKA J. "Picture processing", technical report 378, May 1975, University of Maryland, College Park, Maryland.

(23) HOLDERMANN F., KAZMIERCZAK H. "Preprocessing of grey-scale pictures", Compute Graphics and Image Processing, 1972, volume 1, pp. 68 à 80.

(24) SAKAI T., NAGAO M., MATSUSHIMA H. "Extraction of invariant picture substructu by computer", Computer Graphics and Image Processing, 1972, volume 1, pp. 81 à 96.

(25) KIMME C., BALLARD D., SKLANSKY J. "Finding circles by an array of accumulatic Communications of the ACM, volume 18, n°2, February 1975, pp. 120 à 12

(26) FUKUNAGA K., HOSTETLER L. "The estimation of the gradient of a density functi with applications in pattern recognition", IEEE Transactions on Inform tion Theory, January 1975, vol IT-21, n°1, pp. 32 à 40.

(27) ZOBRIST A. L., THOMSON W. B. "Building a distance function for gestalt groupi IEEE Transactions on Computers, vol C-4, n°7, July 1975, pp. 718 à 728

(28) RITTER G. L., WOODRUFF H., LOWRY S., ISENHOUR T. "An algorithm for a selectiv nearest neighbor decision rule", IEEE Transactions on Information Theo November 1975, pp. 665 à 668.

(29) SCHNEIDER W., FINK W., VAN DER PIEPEN H. "Image evaluation facilitated by opt cal aeral cell sampling", Optics Communications, vol 14, n°1, May 197 pp. 42 à 45.

(30) RAMAPRIYAN H. K. "A multilevel approach to sequential detection of pictoria features", IEEE Transactions on computers, vol C-25, n°1, jan 1976, p 66 à 78 .

(31) HOLDEN A., MORRIN T. "A feasible computer system for grey level pictorial pa recognition", Pattern Recognition, vol 7, n°3, pp. 147 à 156, 1975 .

(32) McKEE J., AGGARWAL J. "Finding the edges of the surfaces of three-dimensiona curved objects by computer", Pattern Recognition, vol 7, n°s1-2, pp. à 52, 1975.

33) BALASUBRAMANIAN N. "Comparison of optical contouring methods", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 42, n°1, jan. 1976, pp. 115 à 120.

34) LAWRENCE R., HERZOG J. "Geology and forestry classification from ERTS-1 digital data", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 41, n°10, oct. 1975, pp.1241 à 1251.

35) BEJARAMO D. "Density slicing applied to forest type delineation", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 41, n°10, oct. 1975, pp. 1029 à 1037 .

36) ULLMANN J. "Binarization using assocaitive addressing", Pattern Recognition, 1974, vol 6, pp. 127 à 135.

37) O'CALLAGHAN J., LOVEDAY J. "Quantitative measurement of soil cracking patterns", Pattern Recognition, vol 5, n°2, 1973, pp. 83 à 98.

38) DEUTCH E. "On the use of binary and gray code schemes for continuous tone picture representation", Pattern Recognition, vol 5, n°2, 1973, pp.121 à 132 .

39) Pattern Recognition (Special Issue on feature extraction), vol 3, n°1, 1971 .

40) YACHIDA M. "Application of color information to visual perception", Pattern Recognition, vol 3, pp. 303 à 323, 1971 .

41) SAKAI T., NAGAO M., FUJIBAYACHI S. "Line extraction and pattern detection in a photograph", Pattern Recognition, vol 1, pp. 233 à 248, 1969 .

42) CHENG G. C., LEDLEY R. S., POLLOCK D. K., ROSENFELD A. "Pictorial pattern recognition", Thomson Book Compagny, 1968 .

43) ROSENFELD A. "Picture processing by computer", Academic Press, New York, 1969 .

44) GRASSELLI A. "Automatic interpretation and classification of images", Academic Press, New York, 1969 .

45) TSIANG P., HARLOW C., LODWICK G. "The computer analysis of chest radiographs", Proc. ACM, 1974 Annual Conf. (San Diego, Calif., nov. 1974), pp.705 à 714.

(46) ORSINGER R. J. "Texture tone study : summary and evaluation", Army Engine Topographic Labs, Fort Belvoir, Va, mars 1975, ETL-0006 .

(47) CHAKRAVASTY I., FREEMAN H. "Development of a on-line image scanning and pr cessing system", New York Univ., Bronx Computer Research Lab., July 1975, CRL-40 .

(48) WESZKA J. S., ROSENFELD A. "A comparative study of texture measures for terrain classification", Maryland Univ., College Park, Computer Scie Center, mars 1975, TR-361 .

"Threshold selection 4",oct. 1974, TR-336 .

"Threshold selection 5",fev. 1975, TR-349 .

(49) EBERLEIN R. B. "An iterative gradient edge detection algorithm", Maryland Univ., mai 1975, TR-382 .

(50) HANSON A. R., RISEMAN E. M., NAGIN P. "Region growing in textured outdoor nes", Massachussets Univ., Amherst, Dept of Computer and Information Sciences, fev. 1975, COINS-TR-75C-3 .

(51) BAKER THOMPSON W. "The role of texture in computerized scene analysis", Un of Southern Calif., Los Angeles, Image Processing Inst., dec. 1974 .

(52) HUMMEL R. A. "Histogram modification techniques", Maryland Univ., sept. 1974, TR-329 .

(53) HARALICK R. M. "Texture tone study with application to digitized imagery" Kansas Univ., Center for Research Inc., Lawrence Remote Sensing Lab. août 1974, RSL-TR-182-6 .

(54) CHEN C. H. "A note on two level display of aerial photographs", Southe ern Massachussets Univ., North Darmouth, Dept of Elect. Eng., jan 19

(55) BULLOCK B. "The performance of edge operators on images with texture", Hughes Research Labs, Malibu, Calif., oct. 1974 .

56) DAVIS L. S., ROSENFELD A., WESZKA J. S. "Region extraction by averaging and thresholding", Maryland Univ., oct. 1974, TR-311 .

57) ROSENFELD A., WESZKA J. S. "Picture recognition", Maryland Univ., dec. 1974, TR-344 .

58) YEN H. H. "Threshold selection techniques 3", Maryland Univ., fev. 1974, TR-294 .

59) BLANDFORD D. K. "LINDA, Line drawing analyser", Illinois Univ., Urbana, Dept of Computer Sciences, juillet 1974, UIUCDS-R-74-668.

60) ZUCKER S. W. "On the foundations of texture : a transformational approach", Maryland Univ., sept. 1974, TR-331 .

61) GALLOWAY M. M. "Texture analysis using gray level run lengths", Maryland Univ., juillet 1974, TR-314 .

62) WEAVER A. C. "On-line character recognition", Illinois Univ., Urbana, août 1974, UIUCDS-R-74-660 .

63) FRANKEN P. A. "Applied optics research report", Arizona Univ., Tucson, Optical Sciences Center, avril 1974, SAMSO-TR-74-133 .

64) CHIEN Y. P., FU K. S. "Preprocessing and feature extraction of picture patterns, with application to chest X-ray image", Purdue Univ., Lafayette, Indiana School of Elect. Eng., avril 1974, TR-EE74-20 .
"A decision function method for boundary detection", oct. 1973, TR-EE73-34 .

65) MOIK J. G. "Introduction to computer image processing", NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, oct. 1973 .

CHAPITRE QUATRE

SIMPLIFICATION DES CONTOURS

CORRELATION NUMERIQUE

Muni des résultats du chapitre trois, c'est-à-dire, de l'image de traits provenant
e l'image de teintes dont on a extrait les contours, le problème est d'utiliser l'ima-
e de traits pour reconnaitre effectivement des formes qui se trouvent sur l'image de
eintes, en particulier des rectangles.

La géométrie nous indique qu'un rectangle est défini, soit par ses côtés, soit par
es sommets. Notre approche a été similaire. Nous avons voulu simplifier l'image de
raits de telle sorte qu'elle soit ramenée à un ensemble de points, ou semis de points,
aractéristiques, dont les groupements de quatre peuvent être assimilés à des représen-
ations de rectangle, ou de telle sorte qu'elle soit ramenée à un ensemble de segments
e droites caractéristiques dont les groupements de quatre peuvent également être assi-
ilés à des représentations de rectangle. L'extraction des contours, la simplification
e ces contours ont été jugés efficaces dans la mesure où l'étape suivante de reconnais-
ance des rectangles a été correctement faite. Nos méthodes mises au point à cet effet,
ont exposées dans les pages suivantes.

I SIMPLIFICATION EN POINTS CARACTERISTIQUES

L'opération qui consiste à réduire l'image de teintes numérisée à l'image de traits mposée à partir des contours visibles sur cette image est en fait une opération de mplification, puisque l'information globale de l'image de traits est plus faible e celle contenue dans l'image numérique. L'image numérique elle-même comporte moins information que l'image optique dont elle est issue. D'une manière générale, nous di- ns que toute opération qui a pour résultat de réduire l'information d'un ensemble don- est une simplification. Un cas particulier est évidemment celui où l'information n'est s réduite : l'opération est alors un transfert. Les transferts d'information peuvent pendant être plus ou moins compliqués, des codages plus ou moins complexes pouvant re utilisés dans des buts divers. Notre propos n'est pas d'étudier de tels codes, mais réaliser des simplifications de l'image initiale avec pour contrainte que l'image mplifiée soit utilisable pour reconnaitre une forme. Nous voulons ne retenir de l'ima- initiale que les seules informations utiles à la résolution d'un problème. L'image ntient des quantités d'information qu'il faut éliminer dans ce but. Si quatre points une image de teintes suffisent pour définir un rectangle se trouvant sur cette image, opération qui consiste à ne fournir que les quatre points en question à la place de ute l'image est la simplification que nous recherchons. Nous voulons identifier l'en- mble des points d'une image pouvant représenter cette image, l'étude de ces points de- nt nous permettre de conclure sur les objets en présence sur l'image. Nous avons appel- ces points des points caractéristiques de l'image. Un certain nombre de paramètres ur sont associés,tels que leurs coordonnées dans le plan. Nous avons appelé ces para- tres les attributs des points caractéristiques.

Aux chapitres un et deux, nous avions regardé comment l'information diminuait au veau de l'analyse de l'image optique dans le but de rendre cette diminution d'infor- tion favorable à notre travail. Au chapitre trois, nous sommes allés plus loin dans

la simplification, puisque nous avons associé une image de traits à l'image de tei numérisée. Notre propos au chapitre quatre est d'aller encore plus loin dans la si fication, nous voulons remplacer l'image de traits par une image de points, celle- devant nous permettre de répondre à la question : l'image de teinte optique examin tient des rectangles dont les sommets sont les points caractéristiques suivants. A faut, nous avons remplacé les points caractéristiques par des segments caractérist la réponse à la question devenant : l'image de teinte optique contient des rectang dont les côtés sont les segments caractéristiques suivants. Ce travail est présent dans la deuxième partie du chapitre. Les points caractéristiques d'une image repré une scène ont pu être utilisés avec succès dans un but de corrélation avec une aut mage représentant la même scène, mais déformée par l'effet d'une prise de vue diff te. Ce travail fait l'objet de la troisième partie.

Recherche des points caractéristiques .

Les points caractéristiques sont définis comme points de rupture de pente sur l contours extraits d'une image de teinte par l'une des méthodes exposées au chapitr trois. Deux des méthodes en question ont été retenues comme fournissant de bons co

1) la décomposition de l'histogramme des transparences de l'image,
2) la détermination d'un seuil de séparation à l'aide d'un histogramme des gradien

Nous partons de l'image de traits, obtenue globalement, ou par fenêtres, l'imag globale étant analysée séquentiellement fenêtre après fenêtre.

Les points caractéristiques sont recherchés par poursuite, ou suivi des contour

I-a Définition .

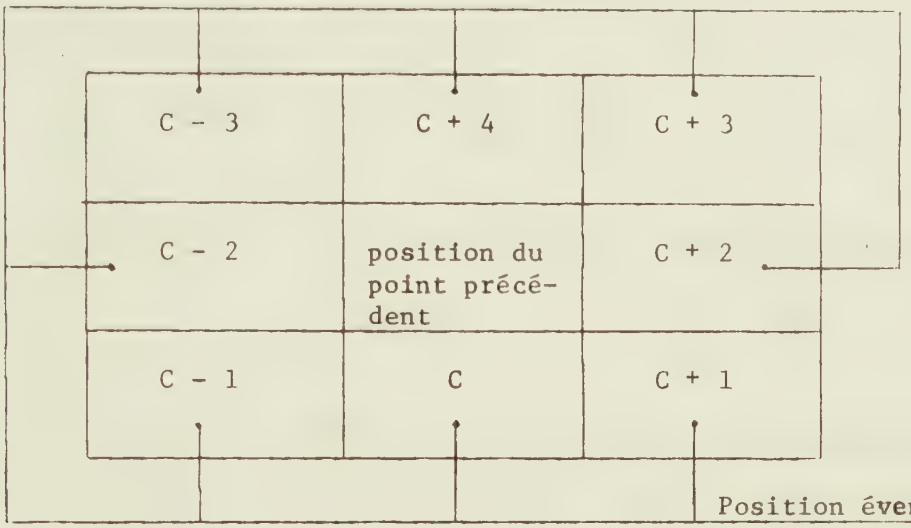
Nous caractérisons la position relative de deux points successifs par un nombre nous appellerons JLP. Chaque point du contour sera donc affecté d'un nombre JLP re sentatif de sa position par rapport au point précédent.

Soient (X,Y) et (X',Y') les coordonnées d'un point et de son suivant sur le con soient $A = X' - X$ et $B = Y' - Y$ tels que $-1 < A < +1$ et $-1 \leq B \leq +1$.

Nous définissons une relation biunivoque entre JLP et (A,B). On a :

$$JLP = C - AB - 2A + 2(B+1)(A-1)(A+1) \qquad (1)$$

JLP prend des valeurs comprises entre (C-4) et (C+3) lorsque le point tourne autour point précédent suivant le schéma ci-contre :



Une ligne de contour est ainsi constituée d'un point de départ, et d'une séquence de mbres JLP pouvant prendre des valeurs comprises entre C - 3 et C + 4 .

gorithme :

Pas 1 : X,Y coordonnées d'un point de départ P ;

Pas 2 : A = X' - X , B = Y' - Y

Pas 3 : faire de A = -1 à + 1 , B = - 1 à + 1 : si P(A,B) = 1 alors JLP = C(A,B), X = X'(A,B) , Y = Y'(A,B), retour à Pas 1 ; sinon fin .

Cette méthode de suivi d'un contour ou d'une ligne de contraste ou de points est à pprocher de la méthode de FREEMAN et d'autres qui en découlent, (1), (2). Elle est pendant plus générale, car elle permet de mesurer les changements de pente de la urbure facilement .

b Test de rupture de pente .

D'autres méthodes de détection d'angles sur des lignes de points sont présentées dans littérature, et des études sont faites pour les améliorer, (3), (4). Notre propos

est surtout de trouver des points caractéristiques. Etant donné un point, nous considérons les NL points précédents et les NL points suivants affectés chacun d'un nombre J

Nous définissons pour chaque point :

- une pente moyenne avant le point : $NPC_1 = \sum_{n=N-NL}^{n=N-1} JLP(n)$

- une pente moyenne après le point : $NPC_2 = \sum_{n=N+1}^{n=N+NL} JLP(n)$

Nous prenons pour point caractéristique un point satisfaisant à la condition :

$$|NPC_1 - NPC_2| > NL \qquad (2)$$

I-c Détection de sauts, choix de la constante C .

Le test de rupture de pente s'appuyant sur 2NL valeurs JLP, il est possible qu'apr une rotation dans le sens trigonométrique, JLP puisse faire un saut, par exemple de C à C-4 , ou C+2 à C-4 , etc...; ou après une rotation dans le sens contraire.

Ces sauts ne sont en aucune manière représentatifs d'un changement de pente important. Il est donc indispensable de déceler ces sauts anormaux.

L'étude des différents cas possibles amène à définir une condition nécessaire et suffisante d'existence de tels sauts.

Cette condition d'existence s'exprime sous la forme :

$$|JLP(N+1) - JLP(N)| > 5 \qquad (3)$$

Une recherche automatique de ces sauts permet, le cas échéant, d'affecter des vale dites normales, par exemple C-6, C-7, etc..., ou C+6, C+7, etc..., pendant la durée d'un test sur un point.

Nous remarquons que les valeurs C-6, C-7, etc..., doivent rester positives.

La constante C a été choisie de la sorte .

d Paramètres enregistrés, ou attributs .

Chaque point caractéristique, numéroté, est enregistré avec un certain nombre de ramètres qu'on appelle attributs du point caractéristique.

1) coordonnées du point :

numéro de colonne IXC
{
numéro de ligne IYC

2) pentes moyennes :

avant le point NPC_1
{
après le point NPC_2

3) angle du contour au point :

$IRPC = NPC_1 - NPC_2$

4) numéro d'ordre sur le contour : NNN

e Cas particuliers .

e-α Points caractéristiques consécutifs .

Dans le cas où plusieurs points consécutifs satisfont à la condition (2), il n'est tenu que celui qui offre la rupture de pente maximale.

De plus, on peut imposer une distance minimum entre deux points caractéristiques un même contour.

e-β Premier point d'un contour .

Pour ces points, la pente avant est déterminée par extrapolation, en se basant sur présence d'un point à droite ou à gauche.

A priori, ces points de départ sont enregistrés comme caractéristiques, puis élimi-s dans divers cas :

ils appartiennent aux bords de l'image, ou de la fenêtre analysée (cas le plus cou-nt),

2) la pente après ces points est très proche de l'horizontale,

3) le contour considéré est trop petit.

Les petits contours, souvent fermés, que nous appelons aussi des taches, peuvent être, ou non, enregistrés sous la forme de leur point le plus haut à gauche (premier point rencontré lors d'un balayage) en fonction du nombre de points qui les composen

I-e-γ Seuil médiocre, fenêtre analysée bruitée.

Lorsque, par suite d'un choix médiocre des seuils permettant d'obtenir les contou l'image de traits analysée est composée d'un grand nombre de petits contours fermés, les points caractéristiques résultants restent significatifs, mais deviennent diffic les à interpréter.

Dans le cas d'une analyse séquentielle de l'image par fenêtres, nous nous sommes donc imposés un nombre maximum de points caractéristiques par fenêtre. Lorsque le no bre de points caractéristiques d'une fenêtre dépasse ce nombre maximum, nous renonço à traiter cette fenêtre. Le nombre maximum est fonction de la taille des fenêtres. I a été fixé à 11 dans le cas d'une analyse de l'image par fenêtres de 50 x 50 points.

I-f Résultats .

Le lecteur voudra bien se reporter à la figure 17, où l'on montre l'image de trai extraite d'une image de teinte numérisée sur 50 x 50 points. Les points caractéristi obtenus par description des contours sont indiqués par des rectangles noirs. On prés te d'autre part, figure 18, une image aérienne dont nous avons analysé la partie en drée, cette dernière est montrée agrandie, figure 19. Nous en donnons l'histogramme transparences, figure 20. La figure 21 présente l'ensemble des points caractéristiqu extraits placés sur une restitution de la partie analysée de l'image.

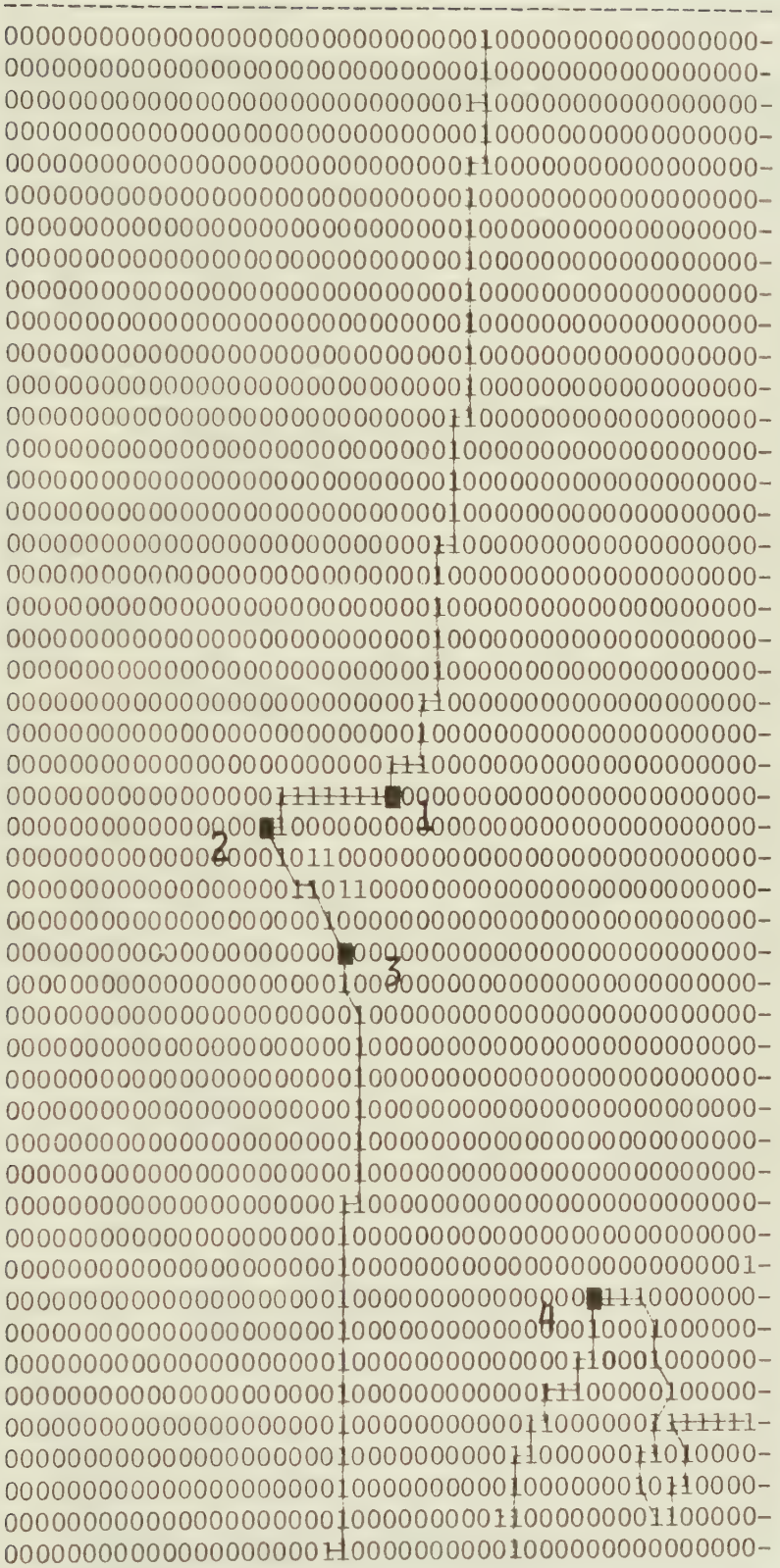


Figure 17 : Exemple de points caractéristiques obtenus par description des contours extraits d'une image de teintes numérisée sur 50 x 50 points .

FIGURE 18 : IMAGE DE PHOTOGRAPHIE AERIENNE .

FIGURE 19 : ZONE DE PHOTOGRAPHIE ANALYSEE, ENCADREE SUR L'IMAGE AERIENNE, FIGURE 18 .

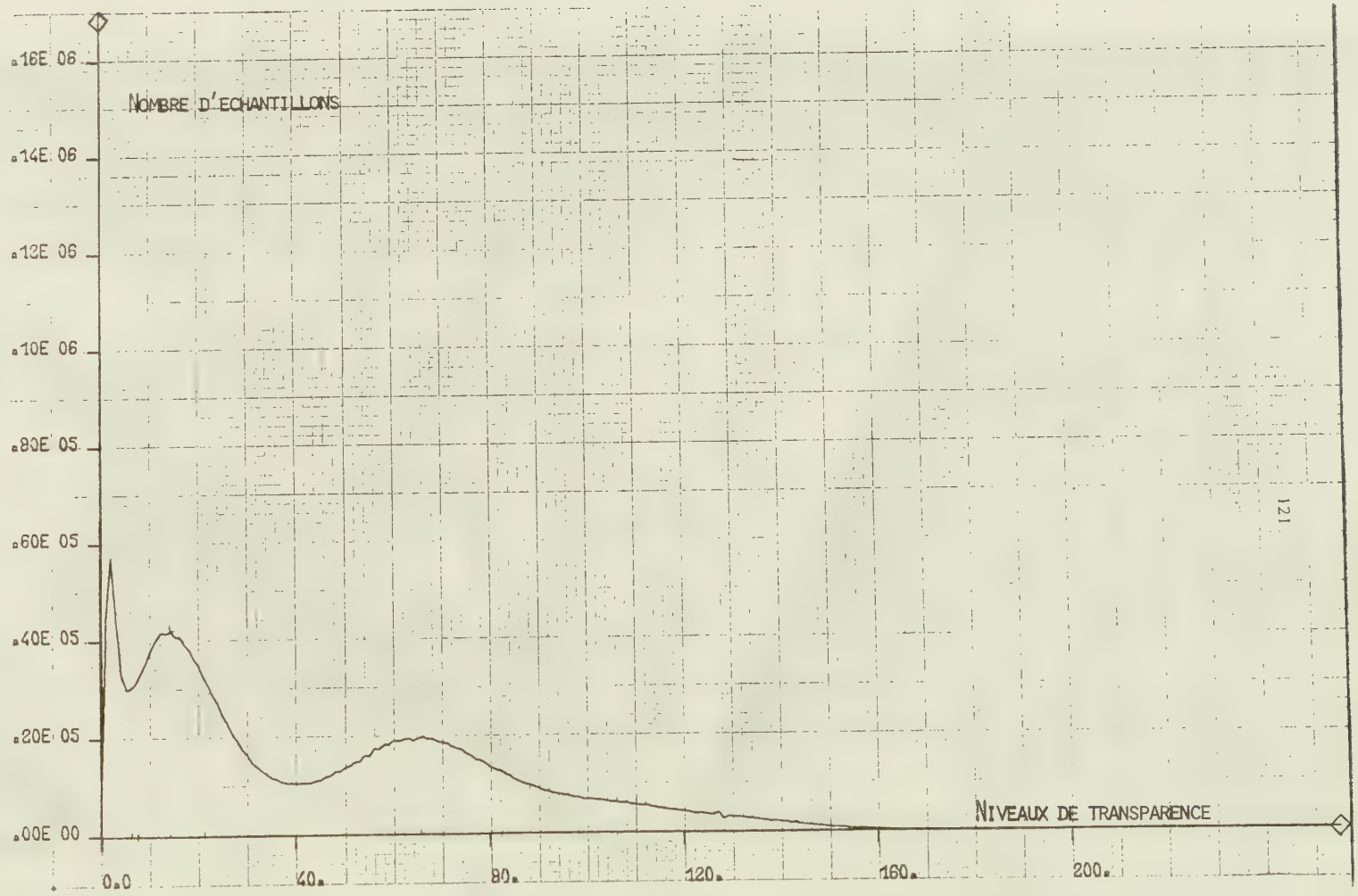


FIGURE 20 : HISTOGRAMME DES TRANSPARENCES DE L'IMAGE AERIENNE, FIGURE 19 .

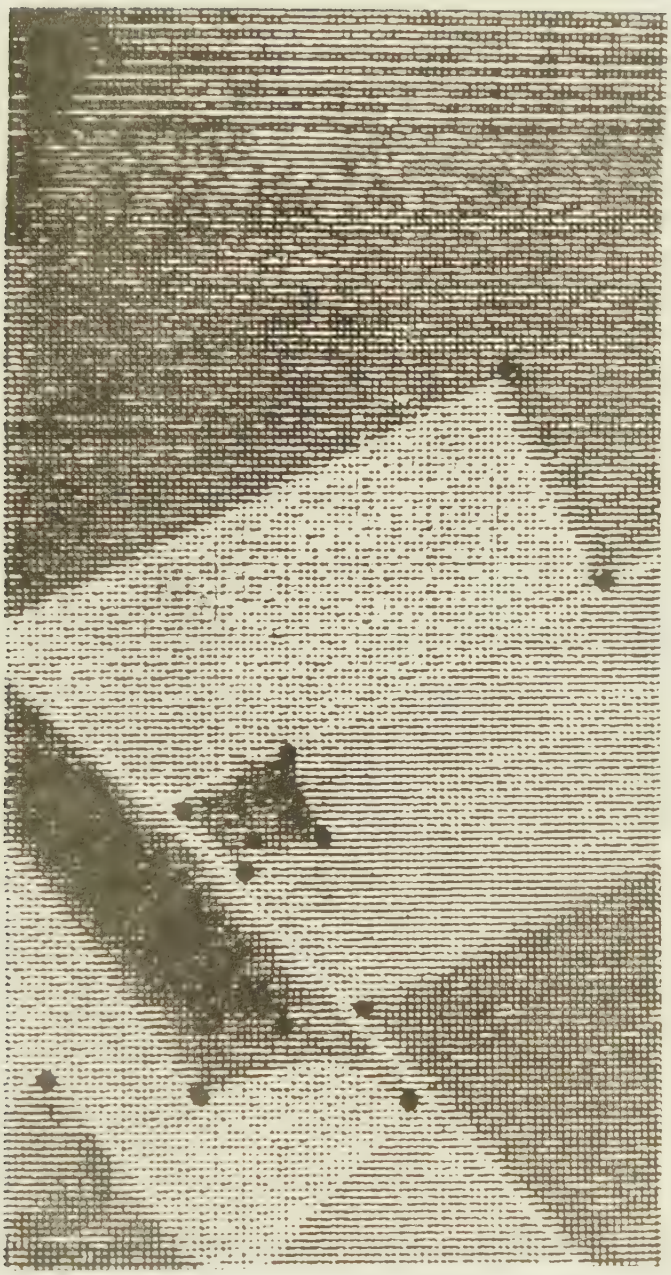


FIGURE 21 : ENSEMBLE DES POINTS CARACTERISTIQUES EXTRAITS DE L'IMAGE, FIGURE 19, REPRESENTES SUR UNE RESTITUTION PAR ORDINATEUR DE CETTE IMAGE.

I-g Conclusions .

Le nuage des points caractéristiques extraits d'une photographie résume assez bi
l'information présente sur cette photographie. Le nuage de points est en effet cons
des sommets des champs visibles sur l'image, ce que nous voulions. L'interpréta-
tion de l'information se complique dès que les images analysées se compliquent, ce
nous oblige, dans le cas où l'on veut répondre à une question de reconnaissance des
formes, à examiner des fenêtres de plus en plus petites, se chevauchant pour recons
re l'ensemble de l'image sans ambiguïté.

Le problème qui vient à l'esprit dès qu'on est capable d'associer un nuage de po
caractéristiques à une image de teintes est celui de sa déformation lorsqu'on trait
une image de teintes similaire, représentative de la même scène, mais dans des cond
tions de prise de vue différentes. A. CHECROUN dans sa thèse, (5), corrèle des ense
de points issus de deux images radars, l'une réelle, l'autre prévisionnelle, mais e
trait les contours manuellement en les limitant aux crêtes. Les points caractéristi
sont alors les barycentres de ces tronçons de contour, et la corrélation s'appuie s
l'ordre des distances entre tous les points pris deux à deux. Notre approche, expos
au paragraphe III, est différente. Nous cherchons à corréler les points de chaque e
ble par comparaison de leurs attributs, les points ayant été déterminés automatique
sur des contours également extraits par ordinateur des images de teintes numérisées

II RECONNAISSANCE DES FORMES A PARTIR DE SEGMENTS CARACTERISTIQUES

Nous avons tenté d'utiliser les points caractéristiques pour reconnaitre des formes géométriques sur les images de teintes. Lorsque les formes sont nettes et peu nombreuses, il est facile d'associer des groupes de points aux formes qu'ils représentent. Cela devient difficile dès que les bords sont flous ou partiellement cachés, quand le nombre des formes observées augmente : c'est le cas de la plupart des photographies aériennes dont nous nous sommes occupés. Les segments de droite, comme représentation de portions de contours sensiblement rectilignes, définis et représentés par leurs extrémités, se sont avérés moins sensibles aux fluctuations. Nous avons donc cherché systématiquement à les utiliser quand on avait pu les extraire, avant de les assembler.

Nous donnons, figure 22 et fig. 23, deux exemples d'ensembles de segments extraits de la photographie aérienne représentée au chapitre trois, p. 90, figure 10.

Les figures 22 et 23 sont des résultats obtenus à partir de l'image constituée des niveaux principaux de l'image numérique. L'image des niveaux principaux a été obtenue à partir de la méthode d'extraction d'histogrammes de l'histogramme de l'image, exposée au chapitre trois, II-b-β.

1ère méthode (figure 22) :

Soit un élément de contour défini par la limite de deux zones de niveaux principaux différents sur dix lignes successives de l'image des niveaux principaux.

Nous formons un quadrilatère à l'aide des points situés à $\pm\Delta$ points de part et d'autre du premier et du dixième point de l'élément de contour, et nous vérifions qu'il se trouve moins de P points de l'élément de contour en dehors de ce quadrilatère et que la longueur d'un segment est supérieure à 6. La continuité est assurée à l'aide d'un recouvrement des éléments de contour analysés. Les segments de droite isolés ont été éliminés.

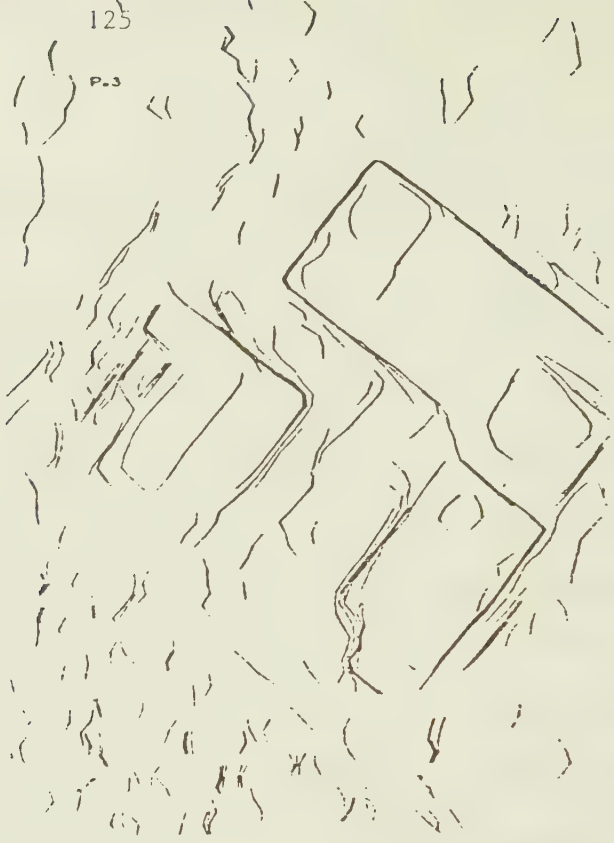


Figure 22 : Ensemble de segments extraits de la photographie aérienne, p.90 , figure 10, (1ère méthode).

Figure 23 : Ensemble de segments extraits de la photographie aérienne, p.90 , figure 10, (2ème méthode).

e méthode (figure 23) :

Cette méthode s'apparente à celle utilisée par A. CHECROUN, (5), (6).Nous appliquons tre filtres principaux qui correspondent chacun aux quatre directions principales du n. Lorsqu'un filtre a donné une réponse supérieure à un seuil fixé, nous cherchons oursuivre le segment avec le même filtre. Les coordonnées réelles du segment sont culées et celui-ci est conservé.

Les méthodes de reconnaissance d'images exposées jusqu'ici sont longues. Les étapes xtraction des contours et de simplification ont été dissociées. Chacune a été étudiée épendamment de l'usage du resultat comme donnée de l'étape suivante. Nous avons donc lu condenser les différents traitements en ne tenant compte que de la contrainte ale : reconnaitre des formes géométriques sur des photographies aériennes. On a utre part utilisé les images de niveaux principaux correspondant aux images de tein- numérisées.

a Algorithme de suivi des contours .

A chaque niveau principal, on fait correspondre une matrice de points de la dimen- n de l'image numérique de départ. Les points de cette matrice prennent la valeur "1" sque les niveaux des points de l'image numérique correspondante sont supérieurs au eau principal de la matrice. Ils prennent la valeur "0" dans le cas contraire.
Le suivi consiste à extraire les coordonnées des points de valeur "1" limitrophes points de valeur "0". Il est effectué séquentiellement sur deux lignes de points de matrice à la fois.
Soient i et i+1 les rangs de ces deux lignes. Les points de ces lignes sont notés ,j) et a(i+1,j) avec j ∈ 2,c+1 où c est le nombre de points d'une ligne.
On associe deux points supplémentaires par ligne, dont on attribue la valeur "0". points sont placés en tête et en queue de ligne, et on les note :

a(i,1) et a(i,c+2) pour la ligne de rang i

et a(i+1,1) et a(i+1,c+2) pour la ligne de rang i+1 .

Le résultat du traitement de deux lignes apparait dans deux registres R_1 et R_2 composés de c+2 points r_1 et r_2 .

Soient le signe + la représentation de la fonction logique OU,

le signe . la représentation de la fonction logique ET,

et le signe ⊕ la représentation d'une fonction logique DILEMME dont le tableau de vérité est

b \ a	0	1
0	0	1
1	1	0

où a et b représentent les valeurs de deux points et $\bar{a}$ et leurs compléments logiques.

On a : $r_1(1) = r_1(c+2) = r_2(1) = r_2(c+2) = 0$

et pour j (2,c+1 :

$$\begin{cases} r_1(j) = r_1(j) + \{a(i,j).(a(i,j) \oplus a(i,j+1))\} \\ r_1(j+1) = \bar{a}(i,j).(a(i,j) \oplus a(i,j+1)) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_2(j) = r_2(j) + \{a(i+1,j).(a(i+1,j) \oplus a(i+1,j+1))\} \\ r_2(j+1) = \bar{a}(i+1,j).(a(i+1,j) \oplus a(i+1,j+1)) \end{cases}$$

On calcule la fonction logique ψ :

$$= (a(i,j) \oplus a(i+1,j)) \oplus (r_1(j) \oplus r_2(j))$$

On a, lorsque $\psi = 1$: $r_1(j) = a(i,j)$ et $r_2(j) = a(i+1,j)$,

et un point de coordonnées (i,j) fait partie d'un contour si $r_1(j) = 1$, de même un point de coordonnées (i+1,j) fait partie d'un contour si $r_2(j) = 1$.

Le traitement de la matrice est séquentiel par groupes de 2 lignes avec recouvremen

Algorithme : Pas 1 : ligne i, ligne (i+1) ;

Pas 2 : ligne i = ligne (i+1), ligne (i+1) = ligne (i+2); etc...

Le recouvrement permet d'associer les points des différents contours de la matrice.

On montre fig. 24 et 26, les résultats obtenus à partir des photographies, fig. 25 et

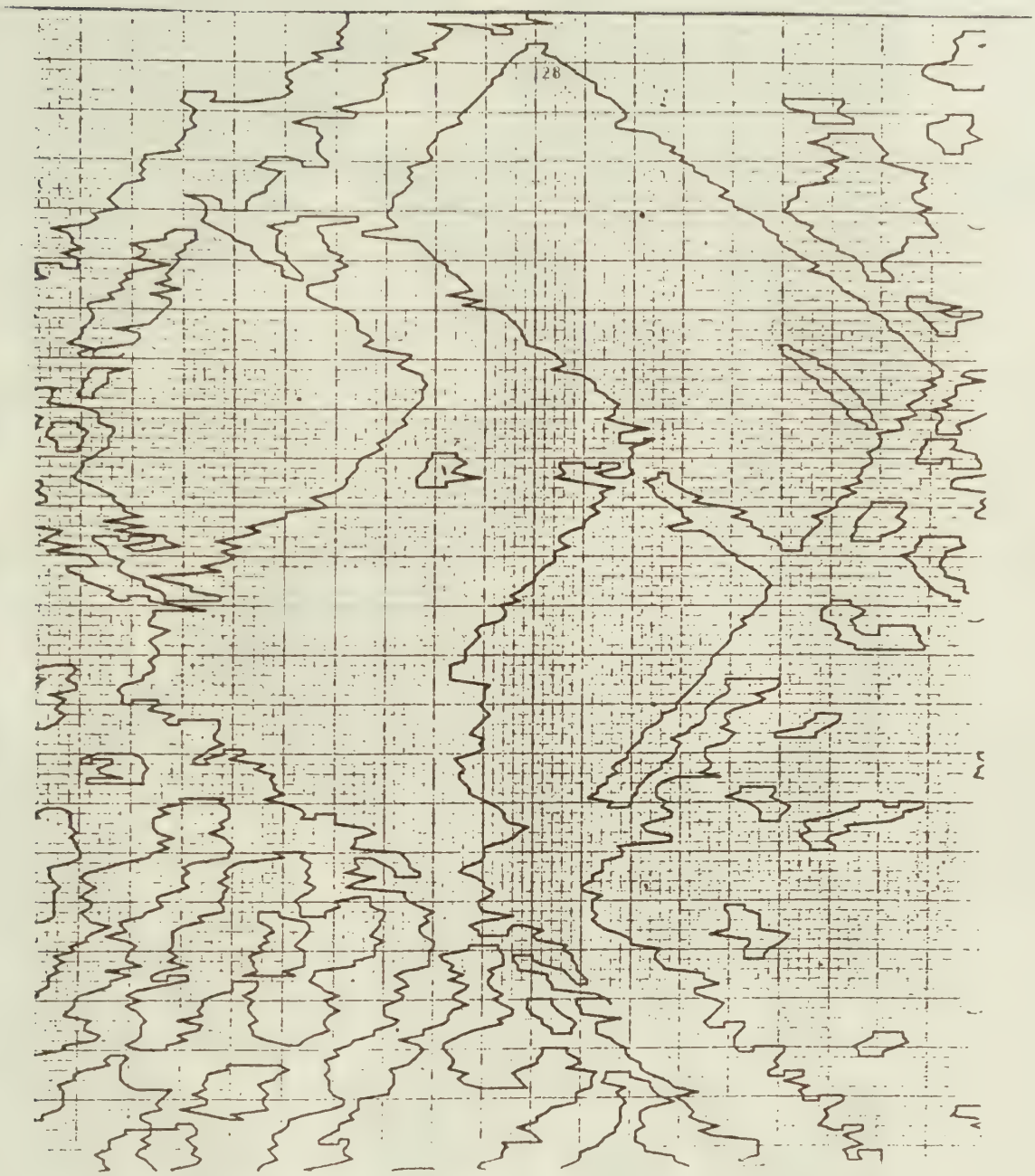


FIGURE 24 : CONTOURS EXTRAITS DE L'IMAGE DE LA FIGURE 25 REDUITE AU PREALABLE A UNE IMAGE DE NIVEAUX PRINCIPAUX.

FIGURE 25 IMAGE DE PHOTOGRAPHIE AERIENNE.

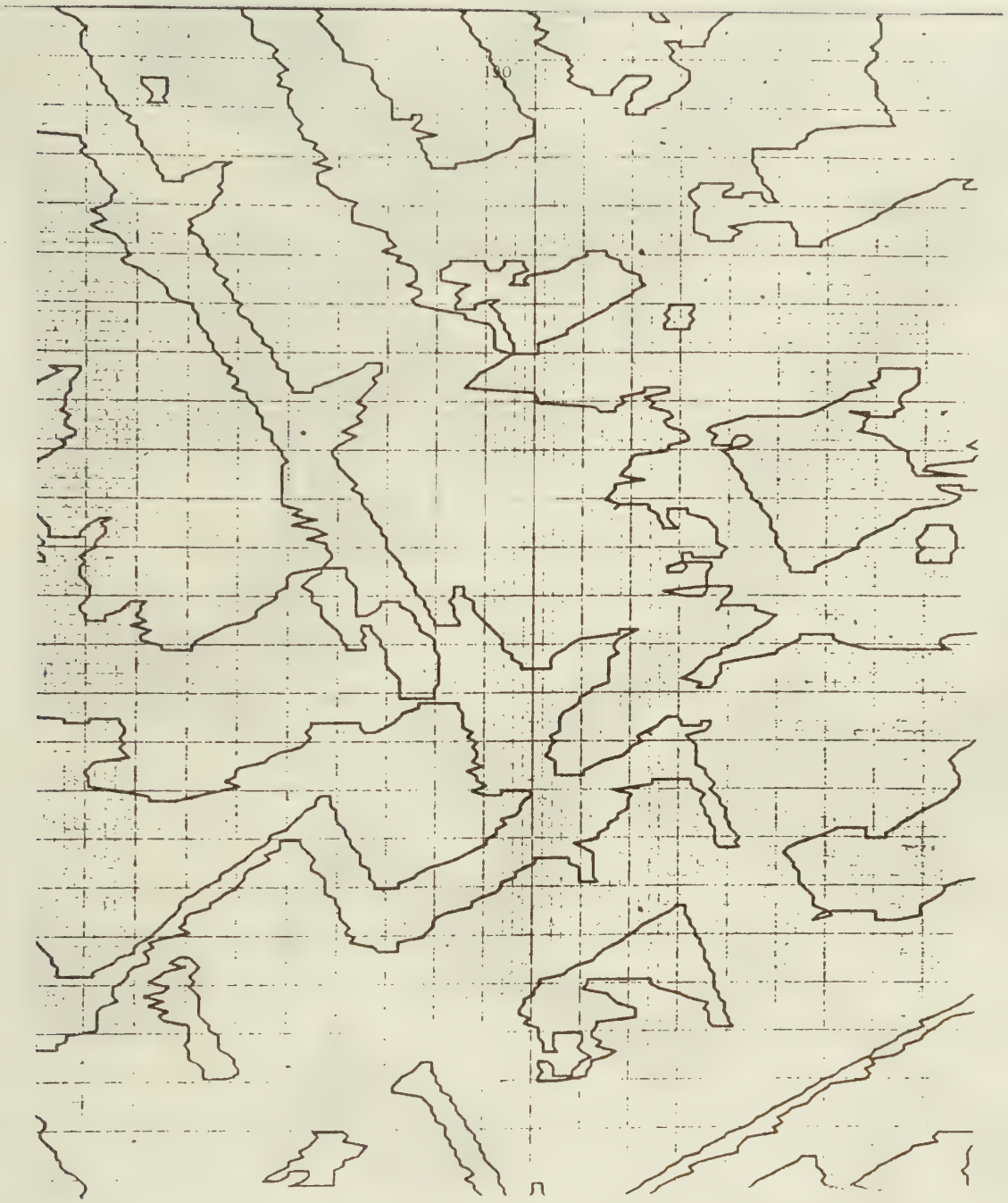


FIGURE 26 : CONTOURS EXTRAITS DE L'IMAGE DE LA FIGURE 27 REDUITE AU PREALABLE A UNE IMAGE DE NIVEAUX PRINCIPAUX.

FIGURE 27 : IMAGE INFRAROUGE DE PHOTOGRAPHIE AERIENNE.

II-b Détermination de rectangles dans un ensemble de segments caractéristiques .

Un rectangle est un ensemble de quatre segments possédant des propritités particulières, lui permettant d'être distingué d'autres quadrilatères. Si on oriente les segments qui le constituent, à l'extrémité de l'un correspond l'origine du suivant jusqu'à obtention d'une figure fermée, l'angle défini par deux segments consécutifs étant égal à $\frac{\pi}{2}$.

La méthode mise au point utilise ces propriétés. A chaque segment caractéristique on associe deux couples de valeurs $(x_0,y_0);(x_1,y_1)$, coordonnées de l'origine et de l'extrémité, et un numéro d'ordre (n). Deux segments caractéristiques d'ordre (n) et (m) forment un angle caractéristique si m = n+1. L'angle caractéristique est droit si l'angle formé par les deux segments caractéristiques consécutifs est droit. On a :

$\hat{AID} = \{((x_0,y_0);(x_1,y_1))_n,((x_0,y_0);(x_1,y_1))_m\}$, où A représente l'origine du 1er segment, B l'extrémité du 2ème segment, et I l'intersection des 2 segments, ou sommet de l'angle caractéristique.

Une conséquence de la définition d'un angle caractéristique est que le point I n'est généralement pas confondu avec l'extrémité du 1er segment, et l'origine du 2ème segment. Un angle caractéristique a ainsi des propriétés plus générales que le point caractéristique défini dans la première partie de ce chapitre. Les angles caractéristiques deviennent des points caractéristiques lorsque les segments qui le constituent ont une origine et une extrémité commune.

Le produit scalaire peut être utilisé pour vérifier que l'angle caractéristique est droit. Un angle caractéristique peut aussi être défini par 3 couples de valeurs $(x_0,y_0)_n$ (x_I,y_I), $(x_1,y_1)_m$.

D'autre part, un segment caractéristique peut appartenir à deux angles caractéristiques différents, figures 28 et 29. Lorsque le point G d'intersection entre le segment commun et la droite construite sur l'origine du 1er segment et l'extrémité du 3ème segment est situé à l'extérieur du segment formé par les sommets des 2 angles caractéristiques, on a affaire à une forme en U .

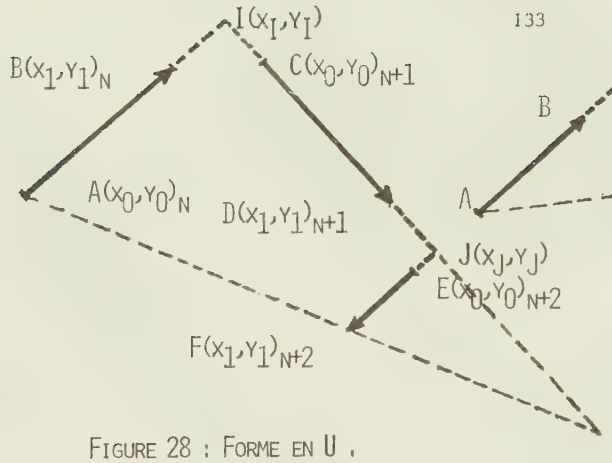


FIGURE 28 : FORME EN U .

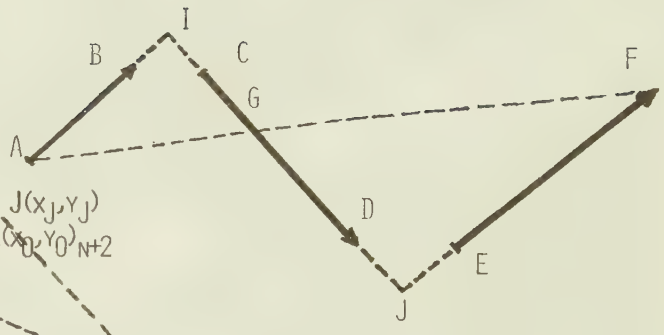


FIGURE 29 : LE SEGMENT COMMUN NE DONNE PAS LIEU A UNE FORME EN U.

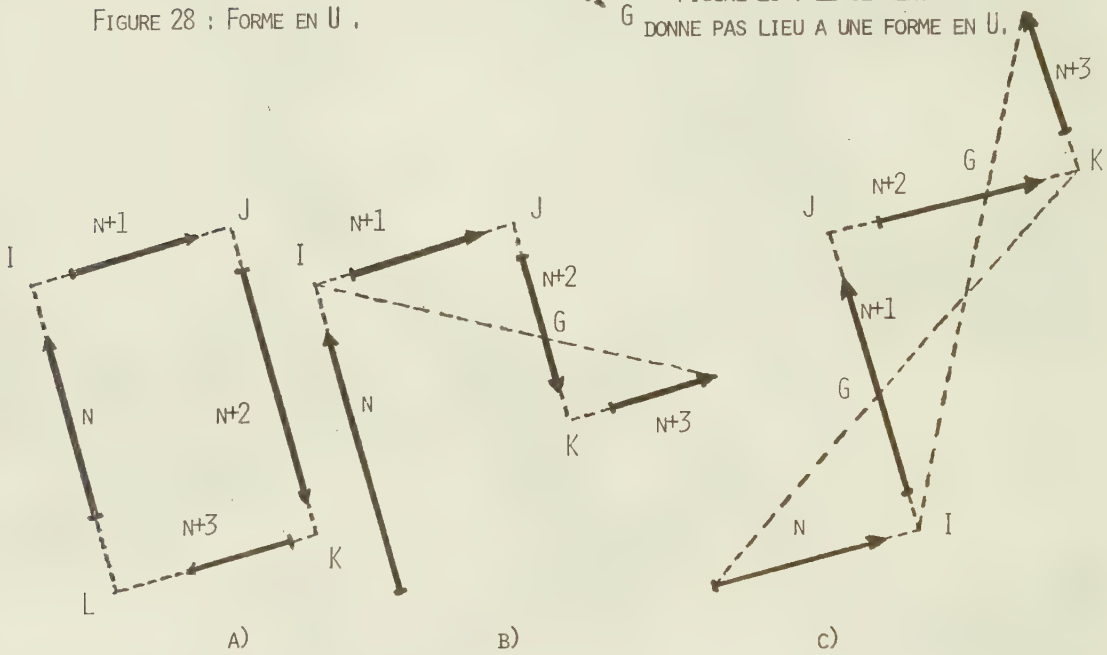


FIGURE 30 : A) RECTANGLE ,
B) LES QUATRE SEGMENTS CARACTERISTIQUES NE DONNENT LIEU QU'A UNE FORME EN U,
C) LES SEGMENTS NE DONNENT LIEU NI A UN RECTANGLE NI A UNE FORME EN U .

Un rectangle est complètement défini s'il existe quatre segments caractéristiques d'ordre (n), (n+1), (n+2), (n+3), constituant les quatre angles caractéristiques droits suivants, figure 30 :

$(x_0,y_0)_n,(x_I,y_I),(x_1,y_1)_{n+1}$

$(x_0,y_0)_{n+1},(x_J,y_J),(x_1,y_1)_{n+2}$

$(x_0,y_0)_{n+2},(x_K,y_K),(x_1,y_1)_{n+3}$

$(x_0,y_0)_{n+3},(x_L,y_L),(x_1,y_1)_n$

L'ensemble ordonné des quatre couples de valeurs (x_I,y_I), (x_J,y_J), (x_K,y_K), (x_L,y_L), résultant de l'assemblage des 4 angles caractéristiques, définit un angle si :

1) les angles caractéristiques sont droits,

2) chaque segment caractéristique commun à deux angles caractéristiques est le sommet d'une forme en U.

Examinons maintenant d'autres groupements d'angles caractéristiques :

1) Les quatre segments caractéristiques d'ordre n, n+1, n+2, n+3, ont permis de construire les trois angles caractéristiques droits suivants :

$(x_0,y_o)_n,(x_I,y_I),(x_1,y_1)_{n+1}$

$(x_0,y_0)_{n+1},(x_J,y_J),(x_1,y_1)_{n+2}$

$(x_0,y_0)_{n+2},(x_K,y_K),(x_1,y_1)_{n+3}$

Lorsque ces angles caractéristiques définissent deux formes en U, on peut se fixer l'angle caractéristique $(x_0,y_0)_{n+3},(x_L,y_L),(x_1,y_1)_n$, et par conséquent construire un rectangle sur les quatre segments caractéristiques.

2) Les quatre segments caractéristiques d'ordre n, n+1, p, p+1, ont permis de construire les deux angles caractéristiques droits suivants :

$(x_0,y_0)_n,(x_I,y_I),(x_1,y_1)_{n+1}$

$(x_0,y_0)_p,(x_K,y_K),(x_1,y_1)_{p+1}$

Le problème est de savoir si les deux angles caractéristiques droits suivants peuvent être construits :

$$(x_0,y_0)_{n+1},(x_J,y_J),(x_1,y_1)_p$$

$$(x_0,y_0)_{p+1},(x_L,y_L),(x_1,y_1)_n$$

c'est le cas par exemple lorsque les segments IK et LJ sont égaux, on a alors affaire à un rectangle.

II-c Résultats pratiques .

On a utilisé systématiquement la méthode décrite, II-b, consistant à regrouper les segments caractéristiques en angles caractéristiques, formes en U, et rectangles, quand cela était possible. Les contours extraits par la méthode exposée en II-a ont été préalablement lissés à l'aide d'un algorithme dit de la corde souvent utilisé par les géographes, et les segments caractéristiques ont été obtenus à l'aide du même algorithme de la corde, utilisé sur le résultat lissé.

II-c-α Algorithme de la corde .

Soit $\overset{\frown}{AB}$ un morceau de contour déjà extrait, et soit $\overline{AB}$ le segment de droite, ou corde, reliant les extrémités A et B du morceau de contour.

Soit M le point du contour le plus éloigné de la corde $\overline{AB}$.

On trace les deux cordes $\overline{AM}$ et $\overline{MB}$ et on cherche les deux points M_1 et M_1' sur les contours $\overset{\frown}{AM}$ et $\overset{\frown}{MB}$ les plus éloignés de ces cordes.

On recommence le procédé jusqu'à ce que la distance entre un point M et la corde correspondante soit inférieure à un seuil donné.

La méthode de la corde consiste au fond à remplacer un contour par une succession de segments satisfaisants à une condition de distance.

On montre, figure 31, l'image de cordes obtenue à partir de l'image des contours de la figure 24, et figures 32 et 33 les images de segments caractéristiques correspondant

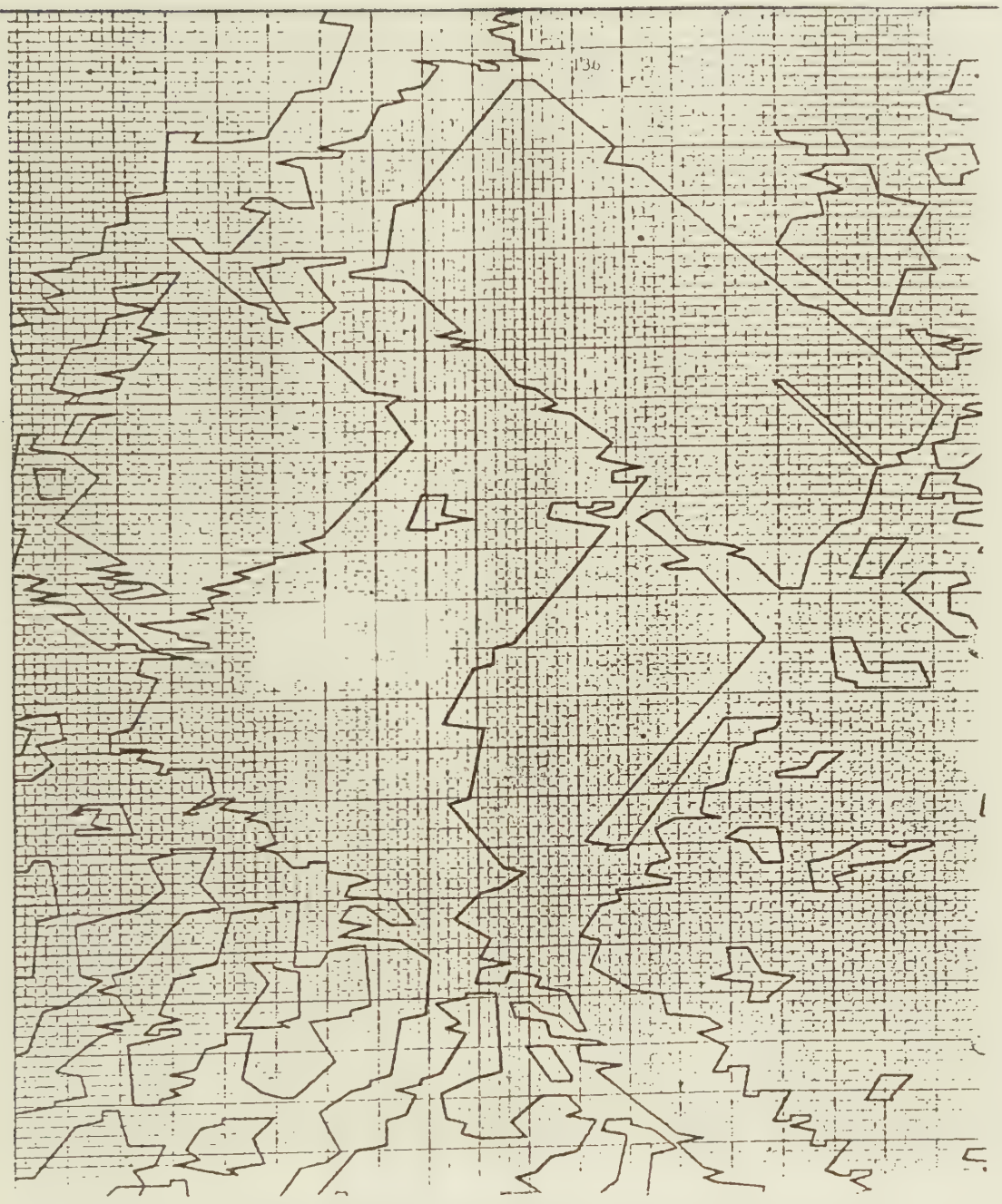


FIGURE 31 : IMAGE DE CORDES OBTENUE A PARTIR DE L'IMAGE DE CONTOURS, FIG.24, EXTRAITE DE L'IMAGE DE LA FIGURE 25.

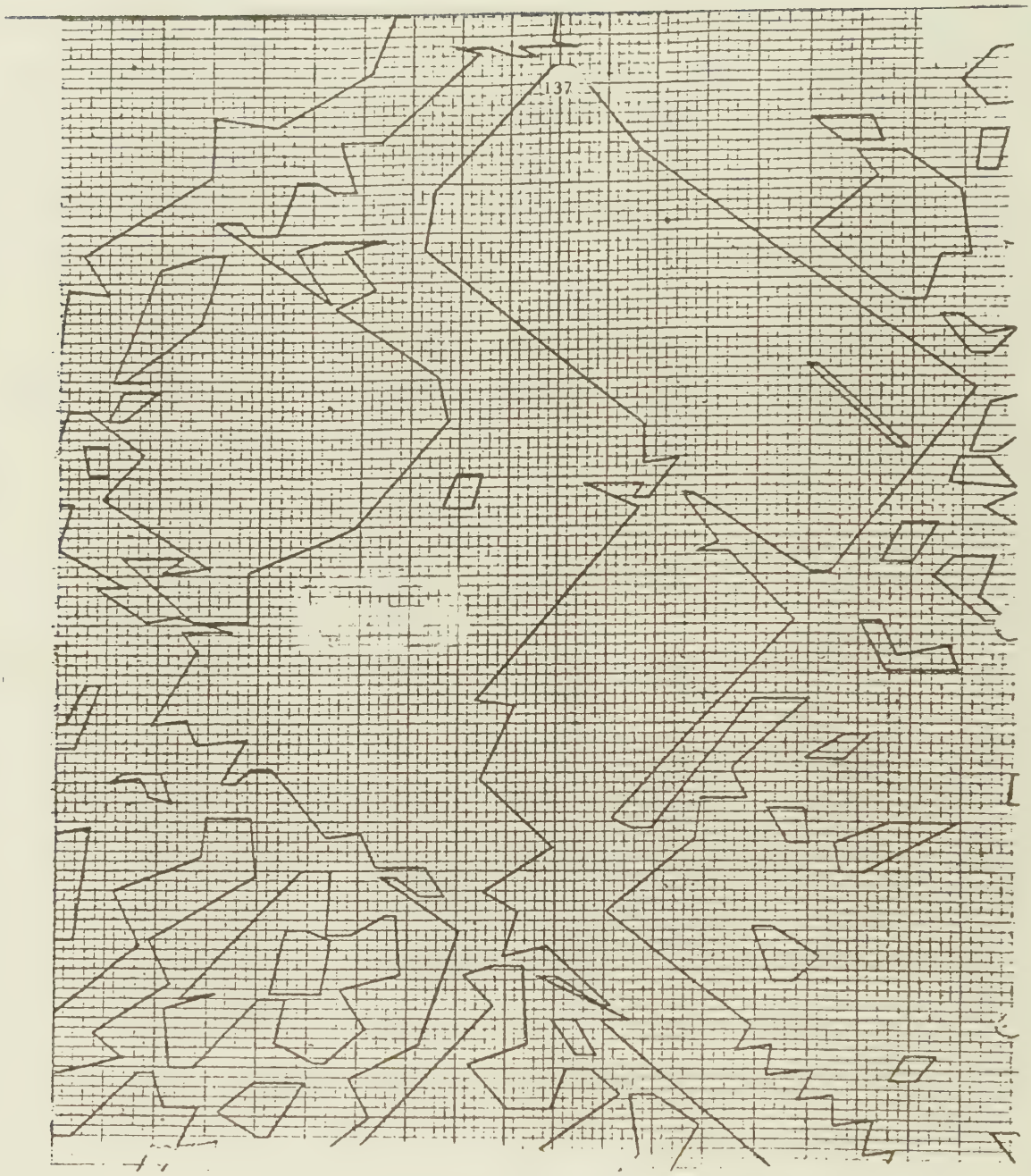


FIGURE 32 : IMAGE DE SEGMENTS CARACTERISTIQUES OBTENUE A PARTIR DE L'IMAGE DE CORDES EXTRAITE DE L'IMAGE DE LA FIGURE 25.

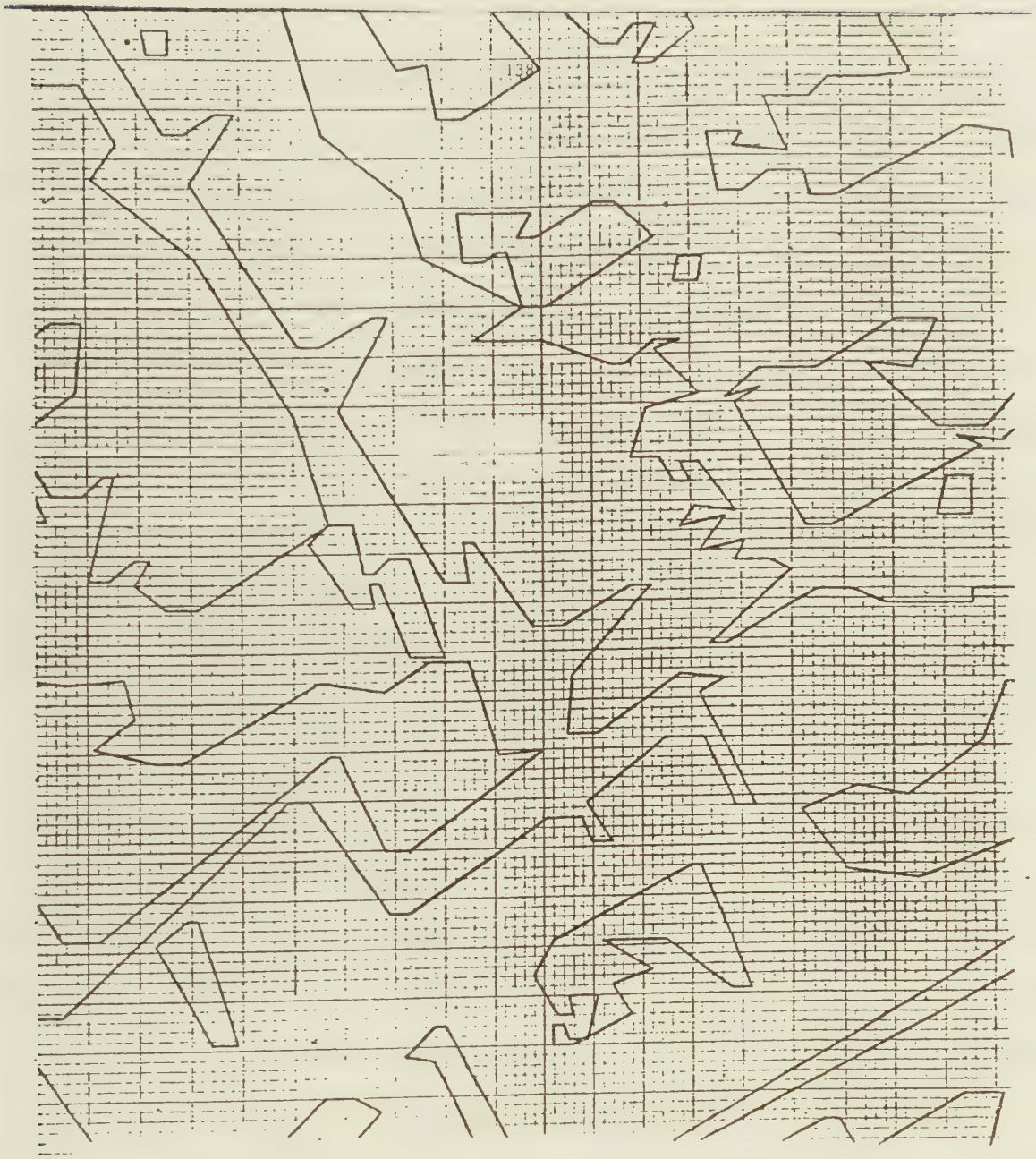


FIGURE 33 : IMAGE DE SEGMENTS CARACTERISTIQUES EXTRAITE DE L'IMAGE DE LA FIGURE 27.

aux photographies 25 et 27, p.129 et 131.

II-c-β Condition de rectitude des angles caractéristiques .

On a généré l'histogramme des directions des segments caractéristiques d'une imag
Lorsque ceux-ci ont des orientations privilégiées, l'histogramme présente des maxima
voir figure 34 l'histogramme correspondant à l'image de la figure 25, où les occuren
sont pondérées proportionnellement à la longueur des segments.

On constate sur cet histogramme que les deux maxima les plus importants correspon
à des ensembles de segments caractéristiques perpendiculaires. La condition de recti
des angles caractéristiques construits sur des segments caractéristiques repose sur
idée. Deux segments d'un même contour reconnus comme ayant les directions respective
$(\alpha\pm\Delta\alpha)$ et $(\alpha+\frac{\pi}{2}\pm\Delta\alpha)$ obtenues d'après les deux maxima de l'histogramme constituent un
gle caractéristique droit s'il n'existe pas d'autre segment caractéristique de direc
$(\alpha\pm\Delta\alpha)$ ou $(\alpha+\frac{\pi}{2}\pm\Delta\alpha)$ situé sur le même contour entre les deux segments initiaux,

II-c-γ Conclusions .

On donne figures 35 et 36 les rectangles et les formes en U reconnus sur les imag
des figures 25 et 27, à l'aide des méthodes exposées. Ces résultats montrent qu'il e
possible d'aborder les problèmes de la reconnaissance des formes avec l'espoir d'abo
tir à l'identification d'objets figurant sur une image réelle de teinte, en parti-
culier sur des images de photographies aériennes.

II-d Conclusions .

Le problème de la reconnaissance des images a été abordé dans ce chapitre avec l'
des contours extraits de ces images. L'idée a été de simplifier ces contours en élém
caractéristiques tels que points, segments,... auxquels on a associé des attributs o

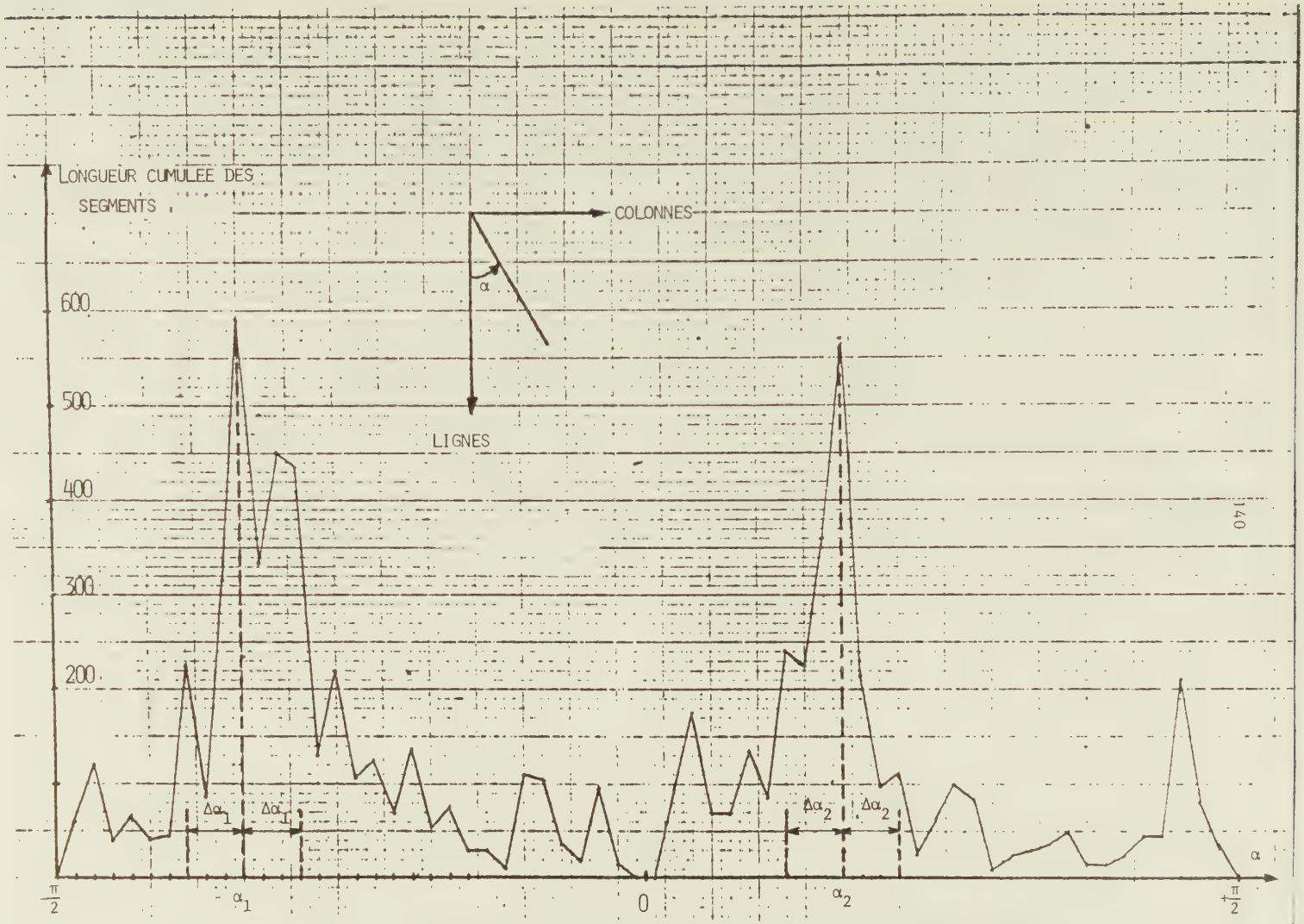


FIGURE 34 : HISTOGRAMME DES DIRECTIONS DES SEGMENTS CARACTERISTIQUES DE L'IMAGE, FIG. 25.

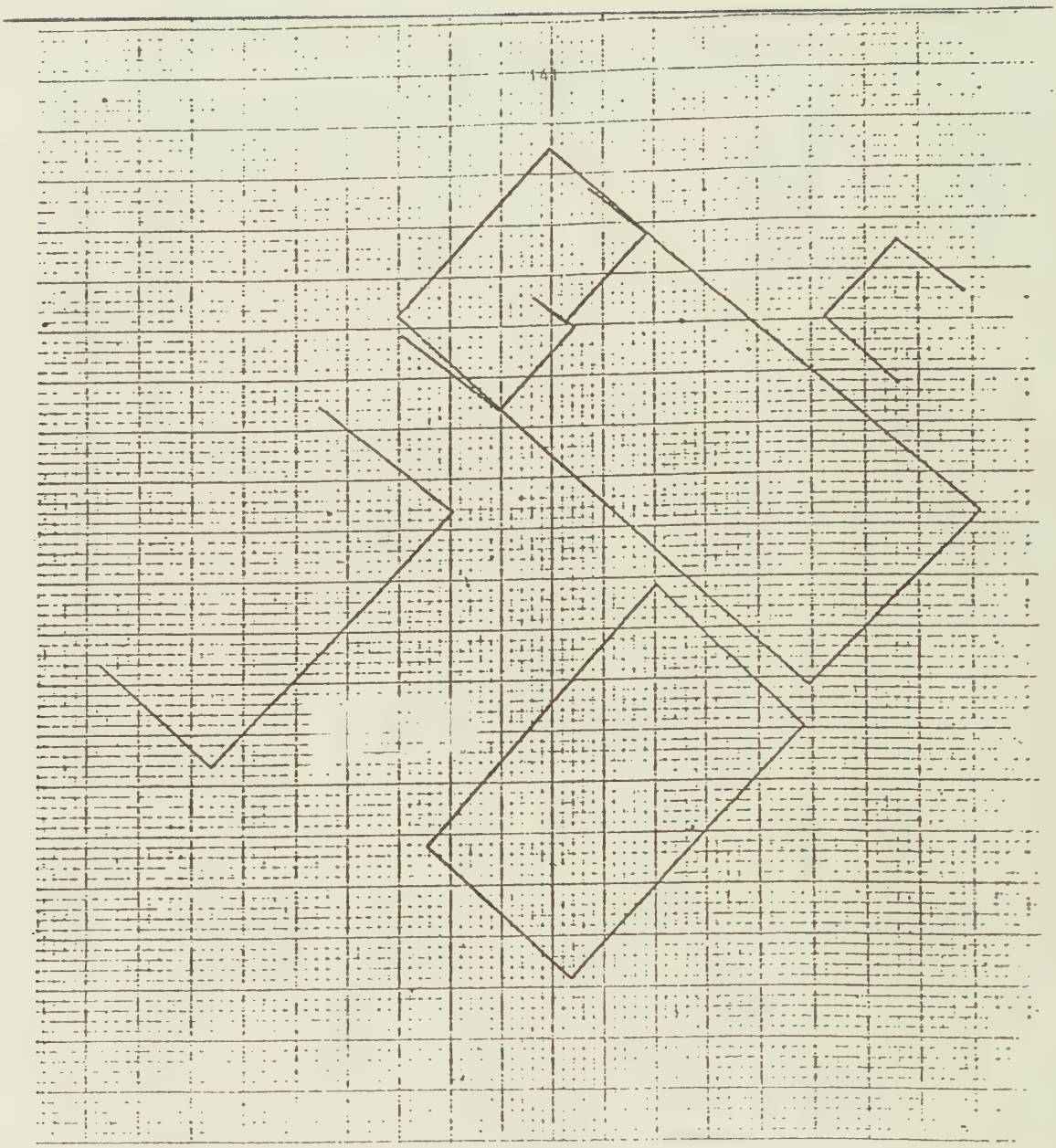


FIGURE 35 : RECTANGLES ET FORMES EN U RECONNUS AUTOMATIQUEMENT SUR L'IMAGE DE LA FIGURE 25, P.129.

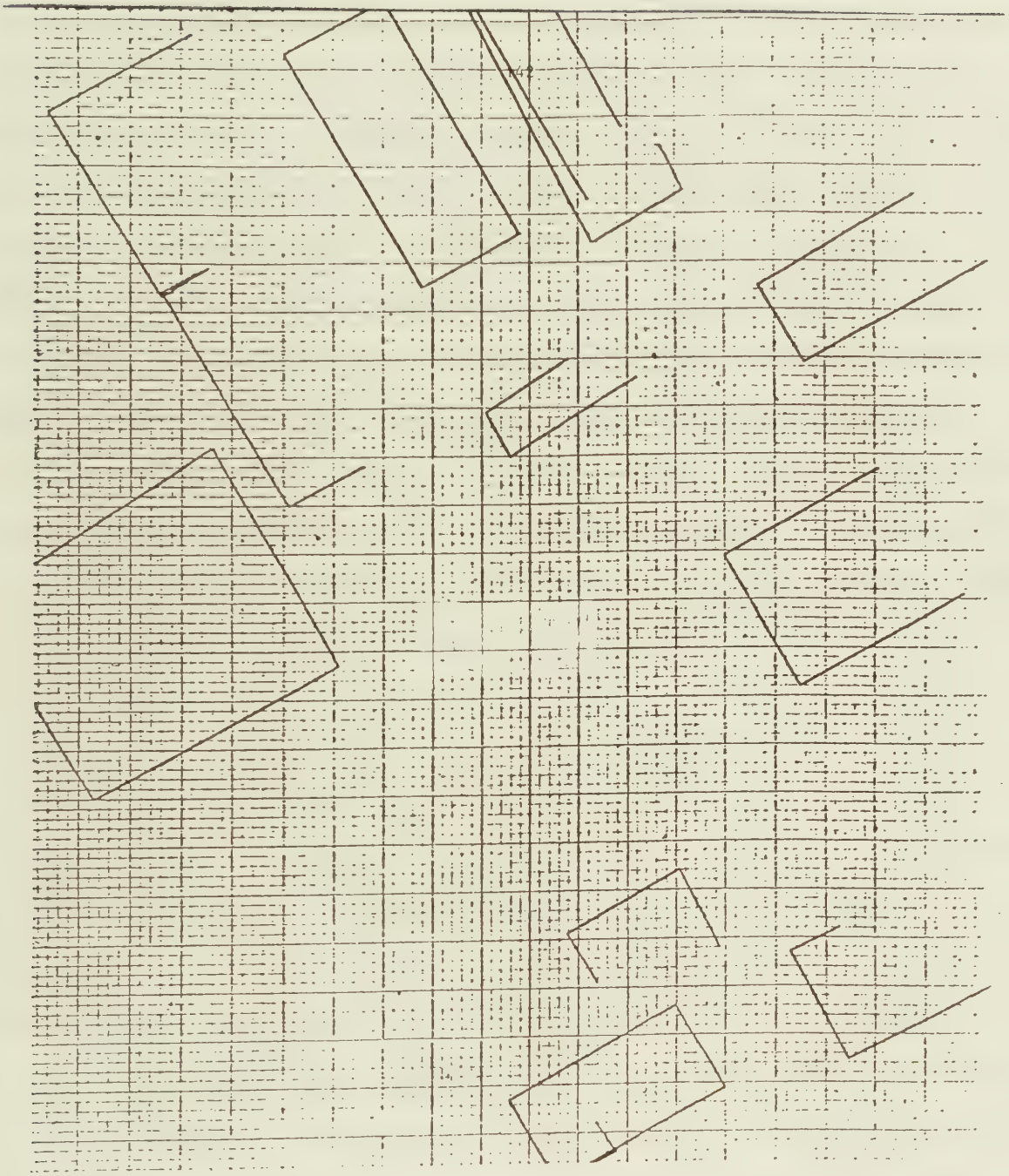


FIGURE 36 : RECTANGLES ET FORMES EN U RECONNUS AUTOMATIQUEMENT SUR L'IMAGE DE LA FIGURE 27, P.131.

nus à partir de la description des contours. On a montré que la reconnaissance de formes géométriques est possible en utilisant systématiquement des règles de sémantiq un rectangle est identifié comme représentation d'un ensemble particulier d'éléments caractéristiques. Les résultats obtenus permettent de penser que des ensembles de for mes plus compliquées sur des images de teinte réelles (et les photographies aériennes sont un exemple typique de telles images) pourront être reconnus automatiquement à partir des éléments caractéristiques. Nous sommes cependant encore loin de l'identifi cation d'objets quelconques, tels que les maisons sur les photographies aériennes. Celles-ci se présentent de manière très différente selon les photographies. Si quelqu fois, elles sont la combinaison de deux rectangles contigus, elles le plus souvent le résultat d'assemblages de formes très variées. Un cas simple est par exemple celui de deux trapèzes complétés par deux triangles. Il y en a beaucoup d'autres.

III CORRELATION NUMERIQUE

ans les deux premières parties de ce chapitre, nous avons montré comment réduire
image de traits, résultat du traitement numérique d'une image de teintes, à une
e de points caractéristiques, ou à une image de segments caractéristiques. L'étude
'image de segments caractéristiques nous a permis d'apporter des éléments de solution
roblème de la reconnaissance de formes géométriques sur des images réelles. L'idée
tenant est d'utiliser l'image de points caractéristiques extraite d'une image de
tes pour la corréler numériquement à l'image de points caractéristiques extraite
e autre image de teintes. Ce travail de corrélation se justifie dans le cas où les
images de teintes représentent la même scène. Il peut être envisagé
le cas où l'on veut poursuivre un objet mobile sur un fond quelconque. Les images
'objet sur son fond sont enregistrées à l'aide d'une caméra, ou saisies à l'aide d'u-
atrice de diodes, (9) : on veut extraire le sous-ensemble de points caractéristiques
espondant à l'objet de l'ensemble des points caractéristiques de chaque image du
. Le problème est le même dans le cas de deux images de photographies aériennes en
uvrement stéréoscopique. Chaque image a été obtenue dans les mêmes conditions
rales, y compris l'altitude, mais l'avion transportant l'appareil photographique
t déplacé entre chaque prise de vue. Le problème est de corréler des points de
ue image en vue de mesurer les déplacements de ces points d'une image à l'autre.
esure du déplacement d'un point d'une image par rapport à son homologue sur l'autre
e, ou parallaxe, permet de calculer l'altitude de ce point sur le terrain.
e problème que nous avons résolu est le suivant : corréler des points caractéristi-
d'une image de teintes à des points caractéristiques d'une image de teintes simi-
e, mais déformée par l'effet d'une prise de vue différente. Les points corrélés
des couples de points caractéristiques auxquels on associe des parallaxes. Le pro-

pos de cette partie est d'exposer les méthodes mises au point et de montrer quelques résultats pratiques.

III-a Première corrélation .

Le but de la première corrélation est de mettre en correspondance les points homologues des deux photographies. Puis une deuxième corrélation sur les points déjà corrélés améliore la précision de leurs coordonnées. La méthode de cette deuxième corrélation est différente : elle utilise les coordonnées approchées obtenue lors de la première corrélation. Nous l'exposons au deuxième paragraphe.

III-a-α Définitions .

On sait déjà qu'un point caractéristique est défini par un certain nombre d'attributs. La corrélation s'effectue par comparaison de ces attributs.

Soit I_{dis} la distance euclidienne entre deux points corrélables. On a :

$$I_{dis} = (IXC(1) - IXC(2))^2 + (IYC(1) - IYC(2))^2$$

où IXC(1) , IYC(1) représentent les coordonnées d'un point caractéristique de la première photographie, et IXC(2) , IYC(2) les coordonnées d'un point caractéristique sur la deuxième photographie.

Soit I_{dpm} la différence entre les pentes moyennes des contours décrits avant d'arriver aux points caractéristiques :

On a : $I_{dpm} = |NPC1(1) - NPC(2)|$

Soit I_{dap} la différence angulaire des contours aux points caractéristiques :

On a : $I_{dap} = |NPC1(2) - NPC2(2) - NPC1(1) + NPC2(1)|$

III-a-β Fonction d'évaluation .

Nous construisons une fonction, dite fonction d'évaluation , dont le minimum définit la proximité maximum d'un couple de points caractéristiques. Cette fonction est de la forme : $I_{fc} = a.I_{dis} + b.I_{dpm} + c.I_{dap}$. Les coefficients a, b, c sont déterminés expérimentalement en tenant compte des remarques suivantes :

- coefficient a : le terme $a.I_{dis}$ ne doit pas être prédominant, car la distance géométrique entre deux points caractéristiques dépend du calage des deux photographies. La distance I_{dis} peut en effet être décomposée en deux distances , 1) une distance de décalage, assimilable à un bruit additif, systématique, mais d'amplitude inconnue ; 2) une distance de déformation locale, liée à la parallaxe, aléatoire .
- coefficient c : le terme $c.I_{dap}$ doit être privilégié car l'angle d'un contour en un point caractéristique est une grandeur qui ne varie pas beaucoup avec les déformations locales.

III-a-γ Résultats pratiques .

On s'est imposé, pour qu'une corrélation soit acceptée, que le minimum de la fonction d'évaluation soit inférieur à un seuil MI fixé expérimentalement. D'autre part, pour éliminer un certain nombre d'erreurs, on compare les formes géométriques obtenues à partir des points corrélés. Les distances interpoints doivent être comparables.

Avec le lecteur optique CALIFE 3 du L.C.A. et un couple de photographies aériennes au 1/30 000 ^{ème} numérisées sur ce lecteur, l'ordre de grandeur des paramètres est le suivant :

a = 0,25 b = 10 c = 13 MI = 100

On donne, figure 37 et 38 un exemple de corrélation de deux fenêtres homologues 50 x 50 points.

Figure 37 : Exemple de corrélation de deux images de teintes numérisées sur 50 x 50 points : on a entouré les points corrélés parmi les points caractéristiques (rectangles noirs) extraits sur les contours.

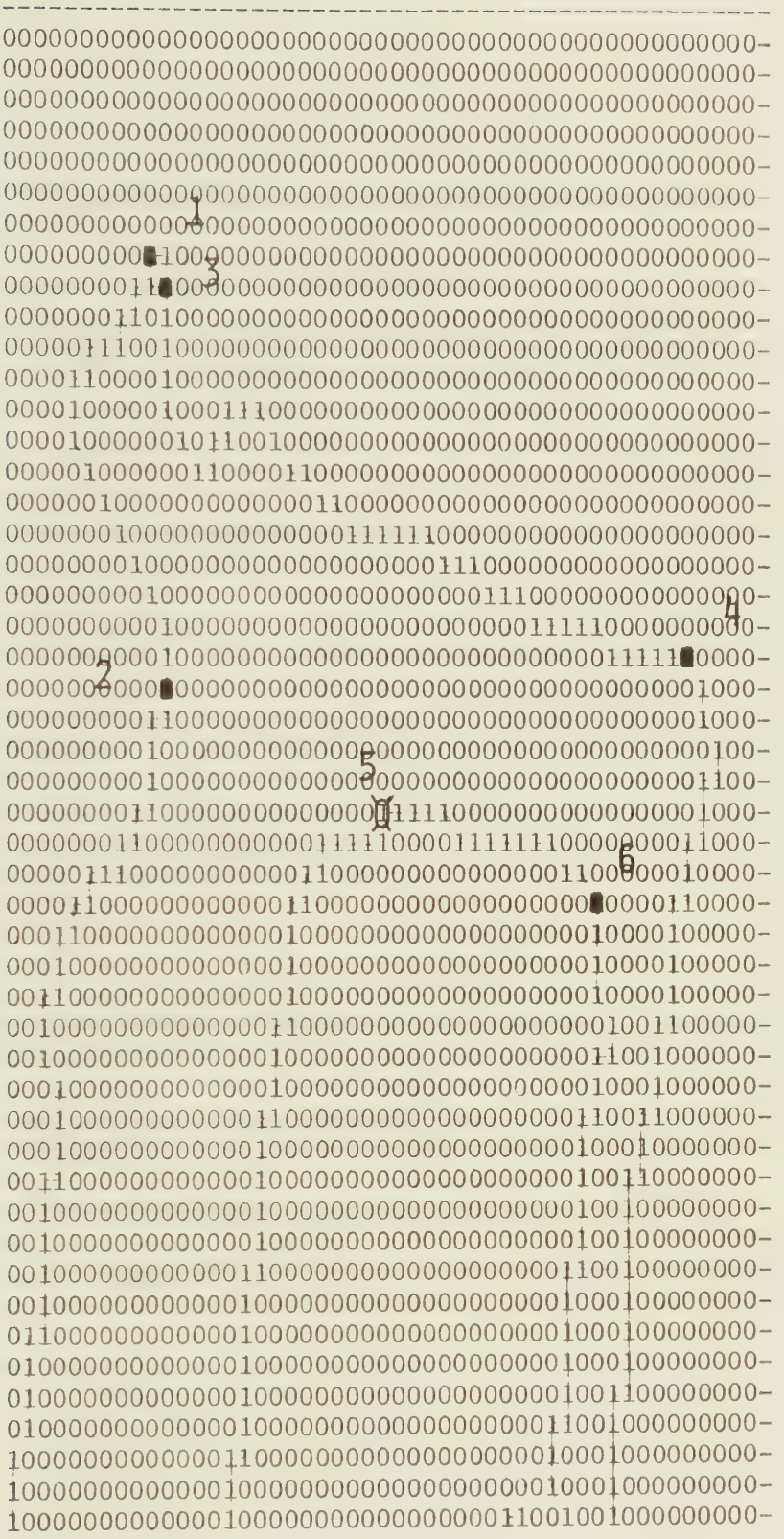


Figure 38 : Exemple de corrélation (voir 1ère image, figure 37) :

on a entouré les points corrélés parmi les points caractéristiques :

le point n°6 de la 1ère image est corrélé avec le point n°5.

III-b Deuxième corrélation .

Soit p l'incertitude sur les abcisses et les ordonnées des points corrélés.

Soient (X_1,Y_1) et (X_2,Y_2) les coordonnées des points corrélés.

Soit (a_{ij}^{IK}) la matrice (n x n) des transparences (niveaux de gris), centrée au point P(I,K). Cette matrice définit l'environnement du point P(I,K).

Soit $S = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}^{I_1K_1} - a_{ij}^{I_2K_2}|$ la similitude des environnements des points (I_1,K_1) et (I_2,K_2) .

Nous cherchons en premier lieu, dans le domaine $\Delta x = (-p-1 , (p+1))$; $\Delta y = (-p-1 , (p+1))$ les minima locaux satisfaisant à la condition :

$$\forall\ x , y \in (-1 , +1)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} | a_{ij}^{X_1Y_1} - a_{ij}^{X_2+\Delta X,Y_2+\Delta Y} | < \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}^{X_1Y_1} - a_{ij}^{X_2+\Delta X+x,Y_2+\Delta Y+y}|$$

Dans le cas où il existe dans le domaine considéré plusieurs minima locaux, nous retenons le minimum absolu, obtenu pour $\Delta X = \Delta X_m$ et $\Delta Y = \Delta Y_m$.

Dans le cas où il n'existe pas dans le domaine considéré de minimum local, nous retenons le minimum absolu dans le domaine $\Delta x = (-p , +p)$, $\Delta y = (-p , +p)$, obtenu pour $\Delta X = \Delta X_m$, $\Delta Y = \Delta Y_m$. Il n'y a pas alors d'amélioration de la précision.

Dans tous les cas, la corrélation finale s'effectue entre les points $P_1(X_1,Y_1)$ et $P_2(X_2+\Delta X_m , Y_2+\Delta Y_m)$, figure 39.

Algorithme :

Pas 1 : faire X_1 de X_1-p-1 à X_1+p+1, Y_1 de Y_1-p-1 à Y_1+p+1;

Pas 2 : faire X_2 de X_2-p-1 à X_2+p+1, Y_2 de Y_2-p-1 à Y_2+p+1;

(soit : n = 2N + 1 et T un grand nombre)

Pas 3 : lire $(a_{ij}^{X_1Y_1})$ de i = X_1-N à X_1+N et de j = Y_1-N à Y_1+N;

Pas 4 : lire $(a_{ij}^{X_2Y_2})$ de i = X_2-N à X_2+N et de j = Y_2-N à Y_2+N;

Pas 5 : calculer S somme de la valeur absolue des différences terme à terme des tableaux $(a_{ij}^{X_1Y_1})$ et $(a_{ij}^{X_2Y_2})$;

Pas 6 : si S < T , T = S ,$(K_1,L_1)=(X_1,Y_1)$, $(K_2,L_2)=(X_2,Y_2)$, continuer;

Pas 7 : imprimer (K_1,L_1) et (K_2,L_2) , fin.

Voisinage du point initialement corrélé.

209	187	167	147	143	144	138
171	142	113	91	74	99	77
112	91	72	75	79	98	114
81	84	108	130	159	177	193
115	135	165	214	245	254	277
197	213	242	286	297	309	319
282	296	325	341	326	336	330

Voisinage du point correspondant corrélé.

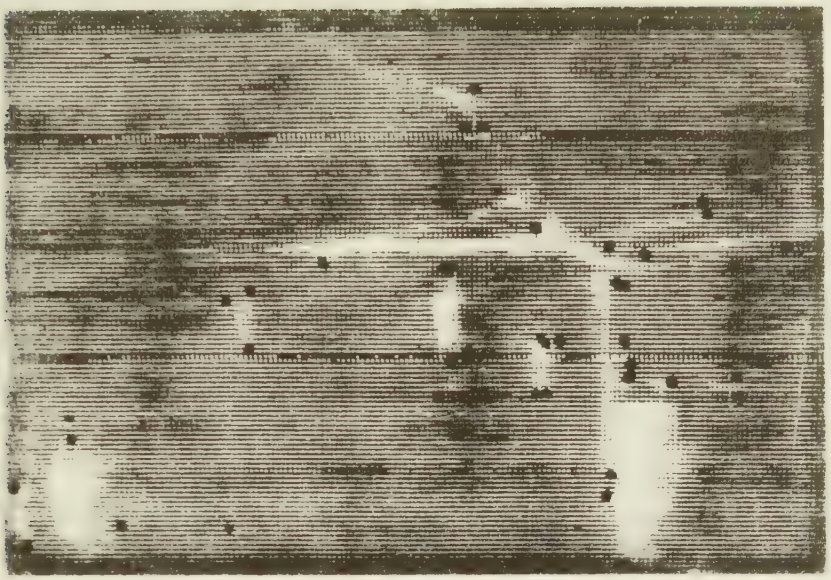
186	174	149	135	113	101	92
227	216	192	165	141	113	79
267	246	213	183	152	129	80
251	226	196	165	135	131	112
202	178	157	143	107	129	118
153	148	148	136	120	131	122
130	136	147	146	138	148	138

Figure 39 : Deuxième corrélation : les points initialement corrélés sont encadrés d'un trait continu, les points finalement corrélés sont encadrés d'un trait interrompu .

III-c Conclusions .

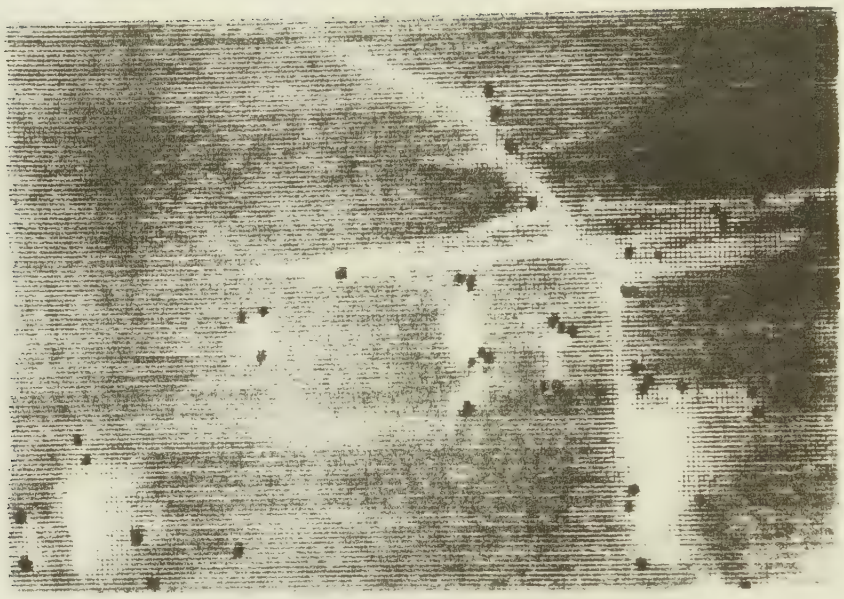
Le programme complet est donné en annexe, avec indication des paramètres à choisir par l'utilisateur en fonction de la nature des photographies à corréler. Nous donnons aux figures suivantes des exemples de corrélation obtenus, figures 40, 41 et 42.

Les nuages de points corrélés obtenus sur un couple de photographies stéréopréparées, c'est-à-dire préalablement calibrées par les géographes pour pouvoir restituer le relief, ont permis d'obtenir un relief dont la précision se situe entre celles données par les appareils PRESA et STEREOMAT utilisés par l'Institut Géographique National; ces appareils ont été construits selon des principes de corrélation analogique.



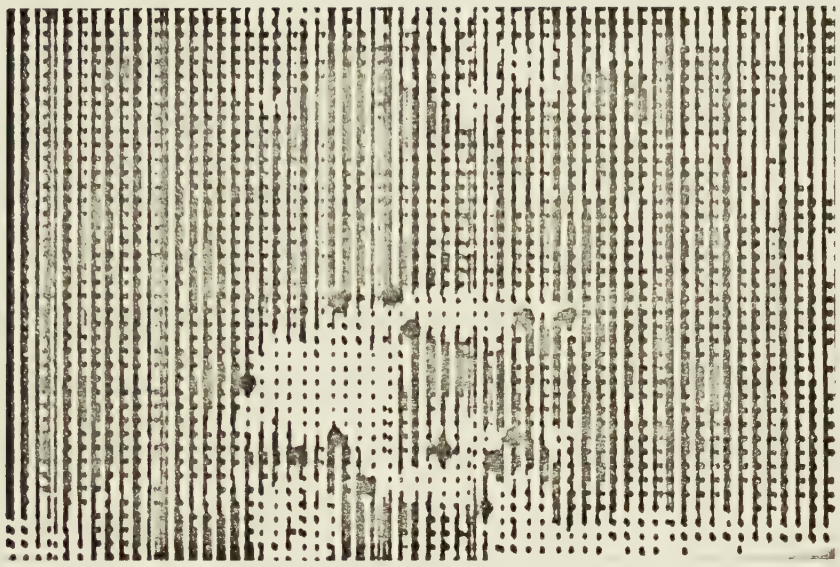
Points caractéristiques d'une photographie A ...

Figure 40 : Exemple de corrélation numérique (1ère photographie).

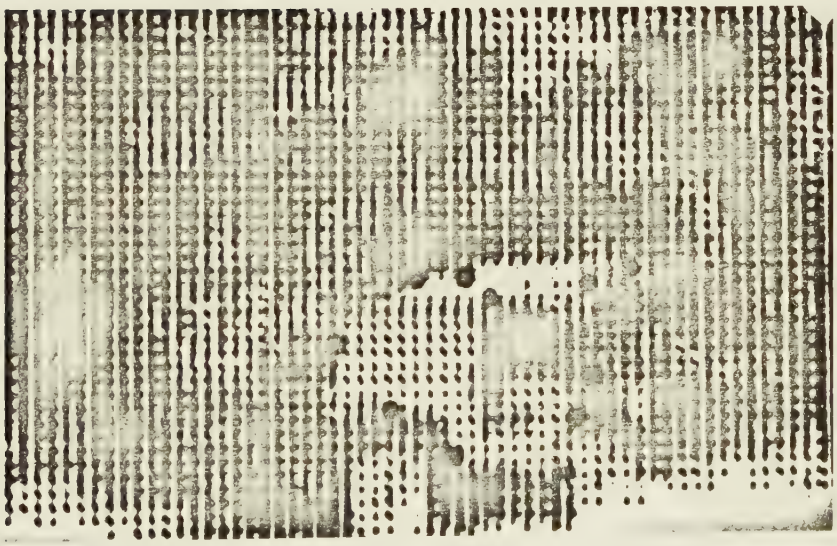


... Corrélés avec les points caractéristiques d'une photographie B .

Figure 41 : Exemple de corrélation numérique (2ème photographie).



Photographie A (Restitution par traceur incrémental)



Photographie B (Restitution par traceur incrémental)

Figure 42 : Exemple de corrélation numérique.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE QUATRE

(1) FREEMAN H. "Boundary encoding and processing", in Picture Processing a Psychopictorics , B. S. Lipkin and A. Rosenfeld , Eds New York Academ 1970 , pp. 241 à 266 .

(2) AGRAWALA A. K. "On generating a line parallel to a digital line , a sequen approach", IEEE Transactions on Computers, Oct. 1975, pp. 983 à 988 .

(3) ROSENFELD A., JOHNSTON E. "Angle detection on digital curves", IEEE Transact on Computers, vol C-22, pp. 875 à 878, Sept. 1973 .

(4) ROSENFELD A., WESZKA J. S. "An improved method of angle detection on digital curves", IEEE Transactions on Computers, Sept. 1975, pp. 940 à 941 .

(5) CHECROUN A. "Reconnaissance des formes par un ordinateur", Thèse d'Etat Paris, 1972 .

(6) SIMON J. C., CHECROUN A. "Procédés de filtrage numérique d'une image de ligne Automatisme, mars 1972, vol 17, pp. 92 à 102 .

(7) BAIRD M. L., KELLY M. D. "A paradigm for semantic picture recognition", Patt Recognition, 1974, vol 6 , pp. 61 à 74 .

(8) MOAYER B., FU K. S. "Syntactic pattern recognition of fingerprints", technic report, School of Electrical Engineering, Purdue University, West Laf yette, Indiana 47907 , déc. 1974 ; et Pattern Recognition, vol 7, n^{os} pp. 1 à 23, 1975 .

(9) ROCHE C. communication privée, déc. 1974.

(10) UDUPA K. V., MURTHY I. S. N. "Some new concepts for encoding line patterns Pattern Recognition, vol 7, n^{o}4, pp. 225 à 233, 1975 .

(11) SIMON J. C. "Recent progress to formal approach of pattern recognition and scene analysis", Pattern Recognition, vol 7, n^{o}3, pp. 117 à 124,

(12) TUNSTALL K. W. "Recognizing patterns : are there processes that precede f ture analysis ? ", Pattern Recognition, vol 7, n^{os}1-2, 1975, pp.96 à

3) LAWRENCE R. D., HERZOG J. H. "Geology and forstry classification from ERTS-1 digital data", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 41, n°10, oct. 1975, pp. 1241 à 1251 .

4) KEATING T. J., WOLF P. B., SCARPACE F. L. "An improved method of digital image correlation", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 41, n°8, août 1975, pp. 993 à 1002 .

5) SABAH G. "La notion d'opérateur de commande en reconnaissance des formes", RAIRO, mars 1975, B-1, pp. 63 à 85 .

6) MOHR L. "Généralisation de la notion de langage à contexte libre, application à l'analyse syntaxique de figures", RAIRO, août 1975, R-2, pp. 52 à 88 .

7) Pattern Recognition (Special Issue on syntactic pattern recognition), vol 3, n°4, 1971, (part 1) ; vol 4, n°1, 1972, (part 2) .

8) Pattern Recognition (Special Issue on picture processing), vol 5, n°2, 1973 .

9) ULSTAD M. "An algorithm for estimating small scale differences between two digital images", Pattern Recognition, vol 5, pp. 323 à 333, 1973 .

10) SHELMAN C. B. "The application of list processing techniques to picture processing", Pattern Recognition, vol 4, pp. 201 à 210, 1972 .

11) FIRSCHEIN O., FISCHLER M. A. "A study in descritive representation of pictu-
rial data", Pattern Recognition, vol 4, pp. 361 à 377, 1972 .

12) TSIANG P. P., HARLOW C. A., LODWICK G. S. "The computer analysis of chest radiographs", Proc. ACM, 1974 Annual Conf. (San Diego, Calif., nov. 1974), pp. 705 à 714 .

13) BULLOCK B. L. "Formation of scene analysis plans using pattern replacement for region structure analysis", Hughes Research Lab., Malibu, Calif., mai 1975 .

(24) CHEN C. H. "Theory and applications of image pattern recognition", S eastern Massachussets Univ., North Dartmouth, Dept of Elect. Eng., 1975, EE75-3 .

(25) GROOMS D.W. "Pattern recognition, a bibliography with abstracts", NTI Springfield, Va, juin 1975 .

(26) KANAL L. "Patterns in pattern recognition, 1968-1974", IEEE Transa tions on information theory, vol IT-20, nov. 1974, pp. 697 à 722 .

(27) FISHMAN D. H., HANSON A. R., RISEMAN E. M. "Some considerations in model building system for scene analysis", Massachussets Univ., Amherst, of Computer and Information Sciences, mars 1975, COINS-TR-75C-2 .

(28) VICTOR A. E., MUNZLINGER F.D. "Pattern recognition, a science of many dis plines", Office of Naval Research, London, England, déc. 1974, ONRL 74 .

(29) HANNAH M. J. "Computer matching of aeras in stereo images", Stanford U Calif., Dept of Computer Science, juillet 1974, STAN-CS-74-438 .

(30) PRATT W. K. "Image processing research", Univ. of Southern Calif., Lo Angeles, Image Processing Inst., 30 sept. 1974, USCIPI-540 .

(31) QUAM L. H. "Computer comparison of pictures", Stanford Univ., Calif. Dept of Computer Science, mai 1971, STAN-CS-71-219 .

(32) CHIEN Y. P., FU K. S. "Preprocessing and feature extraction of picture pa with application to chest X-ray images", Purdue Univ., Lafayette, I School of Electr. Eng. , avril 1974, TR-EE74-20 .

(33) MOIK J. G. "Introduction to computer image processing", NASA, Goddar Space Flight Center, Greenbelt, Md, oct. 1973 .

ONCLUSIONS GENERALES

Nous avons montré qu'il est possible, par extraction puis simplification d'informa-
ions de l'image numérique, résultat de l'analyse point par point de la transparence
images de teintes particulières, d'identifier des objets de caractère géométrique,
u de corréler numériquement deux images différentes représentatives de la même scène.
a reconnaissance de formes rectangulaires sur les images aériennes, et la corrélation
e certains points entre deux clichés, appliqué au cas de la constitution d'un fichier
ltimétrique à partir d'un couple en recouvrement stéréoscopique de photographies
ériennes, ont donné des résultats très satisfaisants et encourageants.

A partir d'une photographie réelle d'image aérienne, nous avons montré qu'il était
ossible d'extraire des formes d'allure rectangulaire et de leur attribuer la qualité
e rectangle. Nous avons également montré expérimentalement qu'il était possible d'ob-
enir numériquement les altitudes d'un ensemble de points d'un couple de photographies
ériennes avec une précision compatible avec les besoins des spécialistes de la carto-
raphie. Plus généralement, nous avons montré qu'il était possible de corréler un
nsemble de points choisis numériquement sur une image avec un autre ensemble de points
oisis de la même manière sur une autre image peu différente de la première globalement,
ais assez différente localement. Le résultat de cette recherche est très important, la
rincipale difficulté de la reconnaissance des formes, et plus particulièrement de la
econnaissance d'images, réside dans le grand nombre d'informations à manipuler et à
nterpréter : un cliché 24 x 36 mm analysé point par point sur 256 niveaux de transpa-
ence tous les 10µm représente une quantité d'information de 8,4 Moctets environ, dont
a plupart est inutile. Le problème est de savoir quelle est cette part et un autre est
e l'éliminer. L'objet du prétraitement est de répondre à ces questions. La réduction
quelques centaines de points (ou segments) caractéristiques est une réduction consi-
érable d'information. La manipulation numérique des images est alors beaucoup plus sim-
le, et la corrélation des points caractéristiques, effectuée dans quelques domaines

précis a été un succès. La reconnaissance de formes rectangulaires à partir de l'ima
réduite à un ensemble de segments caractéristiques a également été un succès. Rien n
s'oppose à une généralistion de ces méthodes de corrélation et de reconnaissance des
formes . On peut imaginer l'extraction d'éléments caractéristiques plus élaborés dor
on cherchera à montrer qu'ils résument l'information d'images entières. Des ensemble
d'éléments caractéristiques décrits selon un langage précis pourraient alors tout
autant être corrélés et les images dont ils seraient issus, être déclarées représen-
tatives de la même scène.

NEXE

Le programme de corrélation numérique de deux photographies a pour données un certain mbre de paramètres. Le choix des valeurs à attribuer à ces paramètres dépend essen-ellement du type de photographie étudiée (taille des objets, richesse en teintes, ...) du but recherché (précision, grand nombre de points corrélés, rapidité, ...). Nous nnons ici les valeurs attribuées dans l'exemple de la figure 42 du chapitre quatre, nsi qu'un tableau indiquant le sens de variation des paramètres en fonction de quel-es contraintes d'utilisation. La liste des paramètres avec leurs notations est donnée début du programme.

Valeur des paramètres pour un cas particulier .

Document de base : photographies aériennes d'un site géographique au 1/30 000ème.

But recherché : restitution du relief du terrain .

Caractéristiques du document, du matériel utilisé, du but recherché :

pauvre en teintes,

bruit du capteur important,

grande précision demandée,

erreurs de corrélation non admises.

L	P	LG	NL	LK	LTC	LH	NC1	NC	A	B	C	MI	ICDG	KDP	JDF1	JDF2
0	2,2	3	8	5	8	2	11	8	0,1	10	13	80	10	7	5	7

2) Tableau des variations .

éléments à prendre en compte	sens de variation de ces éléments	IL	P	LG	NL	LK	LTC	LM	NC1	NC	A	B	C	MI	ICDG	KDP	JDF1	JDF2
Taille des objets à reconnaître	+	+		+	+	+	+	+	-	-	-	+	+			-		
Richesse en teintes du document	+	-	-	-		-	-		+	+								
Précision demandée erreur non admise	+	-	+		+	+	+	+	-	-				-	-	-		+
Maximum de points demandé, erreur admise	+	+	-		-	-	-	-	+	+				+	+	+		-
Bruit du capteur optique	+	-	+	+														
Objet s'étant déplacé d'un document à l'autre	+										-	+	+		+			
Rapidité d'exécution	+	+															-	-

3) LISTING DU PROGRAMME DE CORRELATION NUMERIQUE .

```
      COMMON LINE(50,50),ITRANS(50,50)
      COMMON IBUF(0:255),JBUF(0:255),NBUF(0:255)
      COMMON IXC(100,2),IYC(100,2),NPC1(100,2),NPC2(100,2)
      COMMON IFRONT(250),KFRONT(250),JUMP(250),NNN(100,2),IRPC(100,2)
      COMMON JX1(20),JX2(20),JY1(20),JY2(20),JCD(20),JRI(20),JRK(20)
      COMMON NX1(100),NX2(100),NY1(100),NY2(100)
      COMMON MAT1(5,5),MAT2(11,11),JDMAT(7,7)
      DIMENSION ID(2),IP(2),IPC(2),JF(2),NRI(2),NRK(2),IPDI(2),IPDK(2)
      DIMENSION LUS(2),LUI(2)
C     ******************************************************************
C
C     VALEURS DES PARAMETRES
C
C     COORDONNEES DU POINT DE DEPART DU PROGRAMME =PHOTO NO 1
      ID(1)=1;IP(1)=5
C     COORDONNEES DU POINT DE DEPART DU PROGRAMME =PHOTO NO 2
      ID(2)=3;IP(2)=1
C     PARAMETRES FIXANT LE NOMBRE DE FENETRES A TRAITER
      I9=1;I3=1
C     COTE DE LA FENETRE ETUDIEE
      IL=50
C     NOMBRE DE POINT CHOISI POUR LE CALCUL DES GRADIENTS MOYENS
      LG=3
C     PARAMETRE FIXANT LA LIMITE DANS LA RECHERCHE DES SEUILS
      P=2.3
C     NOMBRE DE POINTS SUR LEQUEL SONT CALCULEES LES PENTES
      LN=8
C     DISTANCE MINIMUM IMPOSEE ENTRE DEUX POINTS CARACTERISTIQUES
      LK=5
C     NOMBRE DE POINTS MINIMUM D'UNE TACHE PRISE EN COMPTE
      LTC=8
C     PARAMETRE FIXANT LA TOLERANCE SUR LE CRITERE D'HORIZONTALITE
      LH=2
C     NOMBRE CRITIQUE DE POINTS CARACTERISTIQUES
      NC1=11
C     NOMBRE CRITIQUE DE POINTS CARACTERISTIQUES CORRELABLES
      NC=8
C     COEFFICIENTS DE LA FONCTION D'EVALUATION DE PROXIMITE CORRELATIVE
      A=0.1;B=10.;C=13.;M1=80
C     ECART MAXIMUM DES BARYCENTRES DES POINTS CORRELES
      ICDG=25
C     ECART MAXIMUM DES DISTANCES INTER-POINTS CORRELES
      KDP=7
C     DIMENSION DE LA MATRICE UTILISEE LORS DE L'AFFINAGE DE LA PRECISION
      JDF1=5
C     DIMENSION DE LA ZONE DE RECHERCHE DU MAXIMUM DE CORRELATION
      JDF2=7
C     ******************************************************************
C
C     INITIALISATIONS
C
      NICIC=0
      JNDIC=0
      JC0=JL1=1
      JF(1)=0;JF(2)=450
```

```
      NRI(1)=NRK(1)=0
      NRI(2)=NRK(2)=0
      JJI(1)=JJI(2)=250
      LF=0
C     ******************************************************************
C
C     LECTURE DE L'INFORMATION
C
      NLOG=8ZF0F2F2F3
      CALL OPEN(NLOG)
      CALL MIDIS(JF(1),IP(1),290,1200)
      NLOG=8ZF0F2F2F6
      CALL OPEN(NLOG)
      CALL MIDIS(JF(2),IP(2),290,1200)
  500 JNDIC=JNDIC+1
      DO 800 NUPH=1,2
      DO 1 I=0,255
      JBUF(I)=0
    1 IBUF(I)=0
      PRINT 101,JCO,JLI
  101 FORMAT(1H1,50X,'****',I3,' / ',I3,'****')
      II=ID(NUPH)+(JCO-1)*(IL-2*LN)+NRI(NUPH)
      KI=IP(NUPH)+(JLI-1)*(IL-2*LN)+NRK(NUPH)
      IF(II.LE.0)II=1
      KPI=KI+1
      PRINT 102,II,KPI
  102 FORMAT(1HO,20X,'POSITION INITIALE  X=',I4,' /  Y=',I4)
      IPDI(NUPH)=II
      IPDK(NUPH)=KI
      CALL FENET(JF(NUPH),IP(NUPH),1200,KI,II,IL,LINE)
C     ******************************************************************
C
C     RECHERCHE D'UN SEUIL STABLE
C
      DO 2 KV=1,IL
      DO 2 IV=LG+1,IL-LG
      D1=D2=0
      DO 21 I=1,LG
      D1=D1+LINE(IV-I,KV)
      D2=D2+LINE(IV+I,KV)
   21 CONTINUE
      D1=D1/LG
      D2=D2/LG
      KD=(D1+D2)/2
      KA=(D1-D2)**2
      IBUF(KD)=IBUF(KD)+KA
      JBUF(KD)=JBUF(KD)+1
    2 CONTINUE
      DO 8 IV=1,IL
      DO 8 KV=LG+1,IL-LG
      D1=D2=0
      DO 22 I=1,LG
      D1=D1+LINE(IV,KV-I)
      D2=D2+LINE(IV,KV+I)
   22 CONTINUE
      D1=D1/LG
```

```
112:          [illegible]
113:          KD=(D1+D2)/2
114:          KA=([illegible])**2
115:          IBUF(KD)=IBUF(KD)+KA
116:          JBUF(KD)=JBUF(KD)+1
117:          [illegible]
118:          DO 30 I=0,255
119:          IF(IBUF(I).EQ.0)NBUF(I)=0;GOTO 30
120:          NBUF(I)=IBUF(I)/SQRT(JBUF(I))
121:       30 CONTINUE
122:          MX=0
123:          IF(NUPH.EQ.1)GO TO 29
124:          [illegible]
125:          [illegible]
126:          IF([illegible].GT.255)[illegible]
127:          DO 28 I=LUI(NUPH),LUS(NUPH)
128:          IF([illegible].GT.MX)MX=NBUF(I); Y=I
129:       28 CONTINUE
130:          NS=I
131:          DO 40 I=0,255
132:          IF(IBUF(I).EQ.0)GO TO 40
133:          NS=NS+1
134:          NT=NT+IBUF(I)
135:       40 CONTINUE
136:          LIMIT=(NT/NS)*P
137:          PRINT 212,NY,MX,LIMIT
138:      212 FORMAT(1H ,20X,'SEUIL = ',I4,5X,'MX=',I4,5X,'LIMITE=',I4)
139:          IF(MX.LT.LIMIT)OUTPUT'UN SEUL NIVEAU=PAS DE FRONTIERE';GO TO 600
140:      C   **********************************************************************
141:      C
142:      C     FILTRAGE
143:      C
144:          DO 401 KV=2,IL-1
145:          DO 401 IV=2,IL-1
146:          LINE(IV,KV)=(LINE(IV-1,KV-1)+LINE(IV,KV-1)+LINE(IV+1,KV-1)
147:         1+LINE(IV-1,KV)+LINE(IV,KV)+LINE(IV+1,KV)
148:         1+LINE(IV-1,KV+1)+LINE(IV,KV+1)+LINE(IV+1,KV+1))/9
149:      401 CONTINUE
150:      C   **********************************************************************
151:      C
152:      C     CONVERSION DE L'IMAGE EN DEUX NIVEAUX
153:      C
154:          DO 312 KV=1,IL
155:          DO 312 IV=1,IL
156:          IF(LINE(IV,KV).LE.MY)LINE(IV,KV)=1;GO TO 312
157:          LINE(IV,KV)=2
158:      312 CONTINUE
159:      C   **********************************************************************
160:      C
161:      C     RECHERCHE DES FRONTIERES
162:      C
163:          DO 201 KV=2,IL
164:          DO 201 IV=1,IL-1
165:          IF(LINE(IV,KV).EQ.LINE(IV+1,KV))ITABS(IV,KV)=0;GO TO 201
166:          ITABS(IV,KV)=1
167:          DO 19[illegible]
```

```
      201 IF(LIN(IV,KV)*EQ*L) GO TO 201
          ITRANS(IV,KV)=1
      201 CONTINUE
          PRINT 211,ITRANS
      211 FORMAT(40X,50I1)
C     ******************************************************************
C
C     RECHERCHE DES POINTS CARACTERISTIQUES
C
      70  JPC=0
          DO 51 KKI=KI+1,KI+IL-2
          DO 31 I=II+1,II+IL-2
          ITR=0
          NB=0
          IF(ITRANS(I-II+1,KKI-KI+1)*EQ*0)ITR=0;GO TO 31
          NB=ITRANS(I-II+1,KKI-KI+1)
          NB=NB+1
          IFRONT(1)=I
          KF=IFRONT(1)=KKI
          ITRANS(I-II+1,KKI-KI+1)=0
          IF(KKI*EQ*KI+1)GO TO 60
          IF((I*EQ*II+1)*OR*(I*EQ*II+IL-2))GO TO 60
          IF((I*EQ*II+2)*OR*(I*EQ*II+IL-3))GO TO 60
          JPC=JPC+1
          ITR=1
          IXC(JPC,JPC)=IFRONT(1)
          IYC(JPC,NUPH)=KFRONT(1)
          NN(JPC,NUPH)=1
          DO 11 J=I-1,I+1
          IF(ITRANS(J-II+1,KKI-KI+2)*EQ*NF)GO TO 7
      11  CONTINUE
          JPC=JPC-1
          DO 1 I=1
      7   IF(J*EQ*(I-1))NPC1(JPC,NUPH)=LN*13;NPC2(JPC,NUPH)=LN*14;GOTO 6
          IF(J*EQ*I)NPC1(JPC,NUPH)=LN*13;NPC2(JPC,NUPH)=LN*15;GOTO 6
          NPC1(JPC,NUPH)=LN*17;NPC2(JPC,NUPH)=LN*16
          GOTO 6
      6   DO 5 J=I-1,I+1
          IF(ITRANS(J-II+1,KKI-KI+2)*EQ*NF)GO TO 6
      5   CONTINUE
          DO TO 31
      4   JPC(2)=16+J-1
          NB=NB+1
          IFRONT(2)=J
          KF=IFRONT(2)=KKI+1
          ITRANS(J-II+1,KKI-KI+2)=0
          IF(((J-II+1)*EQ*IL)*OR*((KKI-KI+2)*LE*IL))GOTO 7
          IF(J*EQ*II)GO TO 70
          DO 10 N=2,250
          NIC=
          NI=KFRONT(N-1);I1=IFRONT(N-1)
      17  IF(NDIC*GE*4)GO TO 70
          IF((KI*GE*KFRONT(N))*AND*((I1*GT*IFRONT(N)))GO TO 13
          IF((KI*LE*KFRONT(N))*AND*((I1*LT*IFRONT(N)))GOTO 11
          IF((KI*GT*KFRONT(N))*AND*((I1*EQ*IFRONT(N)))GO TO 12
          DO 20 JJ1=I1,IFRONT(N)+1,-1
```

```
224:          I1=JJ1
225:          IF(ITRANS(I1-II+1,K1-I+1)*EQ.NF)GO TO 16
226:      C   CONTINUE
227:          JDIC=JDIC+1
228:          GO TO 17
229:      11  DO 15 JJ1=K1,KFRONT(N)+1
230:          K1=JJ1
231:          IF(ITRANS(I1-II+1,JJ1-K1+1)*EQ.NF)GO TO 16
232:      15  CONTINUE
233:          JDIC=JDIC+1
234:          GO TO 17
235:      16  DO 18 JJ1=I1,IFRONT(N)+1
236:          I1=JJ1
237:          IF(ITRANS(JJ1-II+1,K1-I+1)*EQ.NF)GO TO 16
238:      18  CONTINUE
239:          JDIC=JDIC+1
240:          GO TO 17
241:      19  DO 19 JJ1=K1,KFRONT(N)+1,-1
242:          K1=JJ1
243:          IF(ITRANS(I1-II+1,JJ1-K1+1)*EQ.NF)GO TO 16
244:      19  CONTINUE
245:          JDIC=JDIC+1
246:          GO TO 17
247:      20  N=N+1
248:          IFRONT(N+1)=I1
249:          KFRONT(N+1)=K1
250:          NA=IFRONT(N)-IFRONT(N+1)
251:          NB=KFRONT(N)-KFRONT(N+1)
252:          JLP(N+1)=15+NA*NB+2*NA+2*(NB+1)*(NA-1)*(NA+1)
253:          ITRANS(I1-II+1,K1-K1+1)=2
254:          IF((I1+EQ.(II+IL-1))*BR*(I1+EQ.II))GOTO 70
255:          IF((K1+EQ.(KI+IL-1))*BR*(K1+EQ.(KI+1)))GOTO 70
256:      21  CONTINUE
257:      7   IF(NO.GT.LTC)GO TO 80
258:          IF((K<I+EQ*KI+1)*BR*(I+EQ.II+1)*BR*(I+EQ.(II+IL-2)))GOTO 31
259:          IF((I.EQ.II+2)*BR*(I+EQ.II+IL-3))GO TO 31
260:          JDIC=JDIC-1
261:          ITA=0
262:          DO 81 I=1,N
263:      81  IF(ITA+EQ.1)GO TO 84
264:      84  IF(NB+LE.(2*LN+1))GO TO 31
265:          DO 81 N=LN+2,NB-LN
266:          JP1=0
267:          JP2=0
268:          IF(JLP(N).EQ.JLP(N+1))GO TO 41
269:          JP2=JP2+1
270:          IF(IABS(JLP(N+M+1)-JLP(N+M))+LT+5)GO TO 32
271:          IF(JLP(N+1+1).GT.JLP(N+M))GO TO 83
272:          JLP(N+M+1)=JLP(N+M+1)+2
273:          GO TO 82
274:      83  JLP(N+M+1)=JLP(N+M+1)-2
275:      41  CONTINUE
276:          DO 44 NI=N-LN,N-1
277:      44  JP1=JP1+JLP(NI)
278:          DO 45 NI=N+1,N+LN
279:      45  JP2=JP2+JLP(NI)
```

```
280:         IRP=IABS(NP1-NP2)
281:         IF(IRP.LT.LN)GO TO 81
282:         IF(JPC.EQ.0)GO TO 46
283:         DO 48 L=1,LK
284:      48 IF(N.EQ.(NNN(JPC,NUPH)+L))GO TO 49
285:         GO TO 46
286:      45 IF(IRP.LE.IRPC(JPC,NUPH))GO TO 81
287:         GO TO 47
288:      84 MPCP=0
289:         DO 85 MT=2,LN+1
290:      85 MPCP=MPCP+JLP(MT)
291:         IF((MPCP.LE.(LN*13+LH)).AND.(MPCP.GE.(LN*13-LH)))JPC=JPC-1;GO TO 8
292:        16
293:         IF((MPCP.LE.(LN*17+LH)).AND.(MPCP.GE.(LN*17-LH)))JPC=JPC-1;GO TO 8
294:        16
295:         NPC2(JPC,NUPH)=MPCP
296:         GO TO 86
297:      46 JPC=JPC+1
298:      47 IRPC(JPC,NUPH)=IRP
299:         IXC(JPC,NUPH)=IFRONT(N)
300:         IYC(JPC,NUPH)=KFRONT(N)
301:         NPC1(JPC,NUPH)=NP1
302:         NPC2(JPC,NUPH)=NP2
303:         NNN(JPC,NUPH)=N
304:      81 CONTINUE
305:         ITA=0
306:      31 CONTINUE
307:      51 CONTINUE
308:         IF(JPC.EQ.0)OUTPUT'PAS DE POINT CARACTERISTIQUE';GO TO 600
309:         IF(JPC.GE.NC1)OUTPUT'TROP DE POINTS CARACTERISTIQUES';GO TO 600
310:         LPC(NUPH)=JPC
311:         PRINT 104
312:     104 FORMAT(1H1,20X,'POINTS CARACTERISTIQUES')
313:         PRINT 100,(I,IXC(I,NUPH),IYC(I,NUPH),NPC1(I,NUPH),NPC2
314:        1(I,NUPH),NNN(I,NUPH),I=1,JPC)
315:     100 FORMAT(1HO,(10X,'I=',I3,5X,'IXC=',I4,5X,'IYC=',I4,5X,
316:        1'NPC1=',I3,5X,'NPC2=',I3,5X,'NNN=',I3))
317:     800 CONTINUE
318: C       ******************************************************************
319: C
320: C       CORRELATION
321: C
322:         LA=0
323:         IF((LPC(1).EQ.0).OR.(LPC(2).EQ.0))OUTPUT'RIEN';GO TO 600
324:         DO 90 JOC=1,LPC(1)
325:         ICD=MI
326:         DO 91 KOC=1,LPC(2)
327:         IF((NNN(JOC,1).EQ.1).OR.(NNN(KOC,2).EQ.1))GO TO 92
328:      93 IDIS=(IXC(JOC,1)-IXC(KOC,2))**2+(IYC(JOC,1)-IYC(KOC,2))**2
329:         IDPM=ABS(NPC1(JOC,1)-NPC1(KOC,2))
330:         IDAP=ABS(NPC2(JOC,1)-NPC1(JOC,1)-NPC2(KOC,2)+NPC1(KOC,2))
331:         IFC=A*IDIS+B*IDPM+C*IDAP
332:         IF(IFC.GT.ICD)GO TO 91
333:         ICD=IFC
334:         LC=KOC
335:         GO TO 91
```

```
336:     92 IF((NN(J8C,1).EQ.1).AND.(NN(K8C,2).E..1))G8 T8 93
337:     91 C8NTINUE
338:        IF(ICD.GE.MI)G8 T8 90
339:        LF=LF+1
340:        LA=LA+1
341:        JC8(LA)=IC
342:        JX1(LA)=IXC(J8C,1)
343:        JY1(LA)=IYC(J8C,1)
344:        JX2(LA)=IXC(LC,2)
345:        JY2(LA)=IYC(LC,2)
346:        JRI(LA)=JX1(LA)-IPDI(1)-JX2(LA)+IP.I(2)
347:        JRK(LA)=JY1(LA)-IPDK(1)-JY2(LA)+IP.K(2)
348:        NX1(LF)=JX1(LA)
349:        NY1(LF)=JY1(LA)
350:        NX2(LF)=JX2(LA)
351:        NY2(LF)=JY2(LA)
352:     90 C8NTINUE
353:        IF(LA.EQ.0)8UTPUT'PAS DE C8UPLE DE P8INTS C8RRELABLES';G8 T8 601
354:        IF(LA.GE.NC)8UTPUT'TR8P DE P8INTS C8RRELABLES - MEFIANCE';G8T8 601
355:        PRINT 105
356:    105 F8RMAT(1H1,20X,'P8INTS C8RRELES')
357: C      ******************************************************************
358: C
359: C      RECADRAGE AUT8MATIJUE
360: C
361:        LRI=LRK=0
362:        D8 3 LB=1,LA
363:        LRI=JRI(LB)+LRI
364:        LRK=JRK(LB)+LRK
365:      3 C8NTINUE
366:        NRI(1)=LRI/LA
367:        NRK(1)=LRK/LA
368:        8UTPUT NRI(1)
369:        8UTPUT NRK(1)
370:        NR=SQRT((NRI(1))**2+(NRK(1))**2)
371:        8UTPUT NR
372:        IF(NR.LE.ICD8)38 T8 901
373:        8UTPUT'C8RRELATI8N GL88ALE INACCEPTABLE'
374:        NRI(1)=NRK(1)=0
375:        G8 T8 601
376: C      ******************************************************************
377: C
378: C      RECHERCHE DES P8INTS ABERRANTS
379: C
380:    901 D8 900 I1=1,LA
381:        D8 900 I2=1,LA
382:        IF(I1.EQ.I2)G8 T8 900
383:        IF((JX2(I1).EQ.JX2(I2)).AND.(JY2(I1).E..JY2(I2)))8UTPUT'D8UBLET';G
384:       1T8 601
385:        IP33=SQRT((JY1(I1)-JY1(I2))**2+(JX1(I1)-JX1(I2))**2)
386:        IP44=SQRT((JY2(I1)-JY2(I2))**2+(JX2(I1)-JX2(I2))**2)
387:        IP11=IABS(IP33-IP44)
388:        8UTPUT IP11
389:        IF(IP11.GT.K8P)8UTPUT'C8UPLES N8N C8MPATIBLES';G8 T8 601
390:     900 C8NTINUE
391:        PRINT 103,(JX1(I),JY1(I),JX2(I),JY2(I),JCD(I),I=1,LA)
```

```
392:   103 FORMAT(1HO,(10X,'X1=',I4,5X,'Y1=',I4,5X,'X2=',I4,5X,'Y2=',I4,5X,'IF
393:      1C=',I4))
394: C     ******************************************************************
395: C
396:       GO TO 600
397:   601 LF=LF-LA
398:   600 IF(JNDIC.EQ.IO)GO TO 200
399:       JLI=JLI+1
400:       GO TO 500
401:   200 JCO=JCO+1
402:       JLI=1
403:       JNDIC=0
404:       NDIC=NDIC+1
405:       IF(NIDIC.GE.IG)GOTO 5
406:       NRI(1)=NRK(1)=0
407:       GO TO 500
408: C     ******************************************************************
409: C
410: C     AFFINAGE DE LA PRECISION SUR LES COORDONNEES DES POINTS CORRELES
411: C     RECHERCHE D'UN MAXIMUM DE CORRELATION
412: C
413:     5 DO 1000 I=1,LF
414:       DO 1003 MRK=1,JDF2
415:       DO 1003 MRI=1,JDF2
416:  1003 JDMAT(MRI,MRK)=0
417:       INX1=NX1(I)-(JDF1-1)/2
418:       INY1=NY1(I)-(JDF1-1)/2
419:       IF((INX1.LE.0).OR.(INX1.GE.(1200-JDF1-JDF2+1)))GOTO 1000
420:       IF(INY1.LT.IP(1))GOTO 1000
421:       CALL FENET(JF(1),IP(1),1200,INY1,INX1,JDF1,MAT1)
422:       INX2=NX2(I)-(JDF1+JDF2)/2+1
423:       INY2=NY2(I)-(JDF1+JDF2)/2+1
424:       IF((INX2.LE.0).OR.(INX2.GE.(1200-JDF1-JDF2+1)))GOTO 1000
425:       IF(INY2.LT.IP(2))GOTO 1000
426:       CALL FENET(JF(2),IP(2),1200,INY2,INX2,(JDF1+JDF2-1),MAT2)
427:       DO 1001 MRK=0,JDF2-1
428:       DO 1001 MRI=0,JDF2-1
429:       DO 1001 IVK=1,JDF1
430:       DO 1001 IVI=1,JDF1
431:       IDMAT=IABS(MAT1(IVI,IVK)-MAT2(MRI+IVI,MRK+IVK))
432:       JDMAT(MRI+1,MRK+1)=JDMAT(MRI+1,MRK+1)+IDMAT
433:  1001 CONTINUE
434:       MAMAX=20000
435:       DO 1005 MRK=2,JDF2-1
436:       DO 1005 MRI=2,JDF2-1
437:       DO 1006 LX=-1,+1
438:       DO 1006 LY=-1,+1
439:       IF(JDMAT(MRI+LX,MRK+LY).LT.JDMAT(MRI,MRK))GO TO 1005
440:  1006 CONTINUE
441:       IF(JDMAT(MRI,MRK).GT.MAMAX)GOTO 1005
442:       MAMAX=JDMAT(MRI,MRK)
443:       KRI=MRI
444:       KRK=MRK
445:  1005 CONTINUE
446:       IF(MAMAX.NE.20000)GO TO 1007
447:       DO 1002 MRK=1,JDF2
```

```
448:       DO 1002 MRI=1,JDF2
449:       IF(JDMAT(MRI,MRK).GT.MAMAX)GOTO 1002
450:       MAMAX=JDMAT(MRI,MRK)
451:       KRI=MRI
452:       KRK=MRK
453:  1002 CONTINUE
454:       OUTPUT I
455:       OUTPUT'MAUVAISE PRECISION'
456:       PRINT 1100,JDMAT
457:  1100 FORMAT(10X,7I5)
458:  1007 NX2(I)=NX2(I)+KRI-(JDF2+1)/2
459:       NY2(I)=NY2(I)+KRK-(JDF2+1)/2
460:       OUTPUT I
461:       PRINT 1100,JDMAT
462:  1005 CONTINUE
463:       PRINT 107
464:   107 FORMAT(1H1,15X,'POINTS CORRELES - RECAPITULATION')
465:       PRINT 108,LF
466:   108 FORMAT(1HO,5X,'NOMBRE TOTAL DE COUPLES CORRELES=',I3)
467:       PRINT 106,(NX1(I),NY1(I),NX2(I),NY2(I),I=1,LF)
468:   106 FORMAT(1HO,(10X,'X1=',I4,5X,'Y1=',I4,5X,'X2=',I4,5X,'Y2=',I4))
469:       STOP
470:       END
```